



TESIS - SK142502

**SINTESIS ZEOLIT-X BERPENDUKUNG SERAT  
ALAM DENGAN VARIASI SERAT DAN WAKTU  
AKTIVASI SERAT UNTUK ADSORPSI-DESORPSI  
CO<sub>2</sub>**

MADA MARIANA LAKAPU  
NRP 1414 201 011

DOSEN PEMBIMBING  
Nurul Widiastuti, M.Si., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN KIMIA FISIK  
JURUSAN KIMIA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2016



THESIS - SK142502

# **SYNTHESIS OF ZEOLITE-X SUPPORTED ON NATURAL FIBER WITH FIBER AND IMMERSION TIME VARIATION FOR CO<sub>2</sub> ADSORPTION- DESORPTION**

MADA MARIANA LAKAPU  
NRP 1414 201 011

SUPERVISOR  
Nurul Widiastuti, M.Si., Ph.D.

MAGISTER PROGRAM  
EXPERTISE FIELD OF PHYSICAL CHEMISTRY  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY  
FACULTY OF MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCES  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2016

**Telah disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Sains (M.Si)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**


**Oleh :  
Mada Mariana Lakapu  
NRP. 1414 201 011**

**Tanggal Ujian : 02 Agustus 2016  
Tanggal Wisuda : September 2016**

**Disetujui oleh :**

  
**1. Nurul Widiastuti, M.Si, Ph.D.  
NIP. 19710425 199412 2 001**

**(Pembimbing)**

  
**2. Dr. Hendro Juwono, M.Si  
NIP. 19610606 198803 1 001**

**(Penguji)**

  
**3. Dr. Afifah Rosyidah, M.Si  
NIP. 19730112 199802 2 001**

**(Penguji)**

  
**4. Yatim Lailun Ni'mah, M.Si, Ph.D  
NIP. 19840524 200812 2 006**

**(Penguji)**



**Direktur Program Pascasarjana,**

  
**Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc, Ph.D  
NIP. 19601202 198701 1 001**

# **SYNTHESIS OF ZEOLITE-X SUPPORTED ON NATURAL FIBER WITH FIBER AND IMMERSION TIME VARIATION FOR CO<sub>2</sub> ADSORPTION-DESORPTION**

**Name** : Mada Mariana Lakapu  
**NRP** : 1414 201 011  
**Department** : Chemistry ITS  
**Supervisor** : Nurul Widiastuti, M.Si, Ph.D

## **ABSTRACT**

This research aims to optimize the immersion time of cotton (*Gossypium Hirsutum* L.), kapok (*Ceiba Petandra* B.) and pineapple fibers (*Ananas Comosus* L.) using NaOH 4M in order to achieve high crystallinity of the zeolite-X supported on natural fiber and to determine the most effective fiber as supporting material for CO<sub>2</sub> adsorption-desorption. In addition, the purpose of this research is to study the kinetics model and thermodynamic aspects of CO<sub>2</sub> adsorption on the materials that has highest CO<sub>2</sub> adsorption capacity. XRD, AFM and SEM results shows that all fibers have highest zeolite-X crystallinity at the same immersion time of 24 hours. Zeolit-x supported on pineapple fiber has highest crystallinity which is 71.0% whereas cotton and kapuk respectively to 55.5% dan 65.0%. Thermal stability of these material at optimum immersion time were up to 300 °C. Zeolite-X supported on pineapple fiber has highest CO<sub>2</sub> adsorption capacity which is 18.97% wt and CO<sub>2</sub> desorption which is 16.64% wt at 30°C and 1 bar among the other fibers. The adsorption kinetics is best approximated by intra particle diffusion model. The result of enthalpy value ( $\Delta H$ ), which is -5.092 kJ/mol indicates that the adsorption process is physical adsorption and spontaneous with the value of Gibbs free energy ( $\Delta G$ ) at temperature of 30 ° C , 40 ° C and 50 ° C, respectively to -0.725, -0.581 and -0.283 kJ/mol. In addition, entropy value of this process is up to -0.0144 kJ/K mol.

**Keywords** : zeolite-X, natural fiber, adsorption-desorption CO<sub>2</sub>, thermodynamic

# **SINTESIS ZEOLIT-X BERPENDUKUNG SERAT ALAM DENGAN VARIASI SERAT DAN WAKTU AKTIVASI SERAT UNTUK ADSORPSI-DESORPSI CO<sub>2</sub>**

**Nama** : Mada Mariana Lakapu  
**NRP** : 1414 201 011  
**Jurusan** : Kimia ITS  
**Pembimbing** : Nurul Widiastuti, M.Si, Ph.D

## **ABSTRAK**

Penelitian ini bertujuan mengetahui waktu aktivasi optimum serat kapas /*Gossypium hirsutum* L., kapuk/*Ceiba petandra* B., dan nanas/*Ananas comosus* dengan NaOH 4M untuk memperoleh zeolit-X berpendukung serat alam dengan kristalinitas yang tinggi dan mengetahui jenis serat alam yang efektif sebagai material pendukung zeolit-X untuk adsorpsi-desorpsi CO<sub>2</sub>. Selain itu, penelitian ini juga mempelajari model kinetika dan beberapa sifat termodinamika adsorpsi CO<sub>2</sub> pada zeolit-X berpendukung serat alam yang memiliki kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> tertinggi. Hasil XRD, AFM dan SEM menunjukkan bahwa waktu aktivasi optimum untuk ketiga jenis serat tersebut sama yaitu pada waktu 24 jam dengan kristalinitas relatif zeolit-X tertinggi pada serat nanas mencapai 71,0%, sedangkan pada kapas 55,5% dan kapuk 65,0%. Stabilitas termal untuk ketiga jenis serat pada kondisi aktivasi optimum mencapai 300 °C. Zeolit-X berpendukung serat nanas juga memiliki kapasitas adsorpsi-desorpsi tertinggi diantara kedua jenis serat tersebut. Kapasitas adsorpsi serat kapas, kapuk dan nanas secara berturut-turut mencapai 12,88%; 15,09% dan 18,97% berat, sedangkan kapasitas desorpsi secara berturut-turut 10,74%; 12,85% dan 16,64%. dengan kondisi suhu adsorpsi yang efektif pada suhu 30 °C dan tekanan 1 bar. Proses adsorpsi mengikuti model kinetika difusi intra partikel dan berlangsung spontan dengan nilai energi bebas Gibbs ( $\Delta G$ ) pada suhu 30 °C, 40 °C dan 50 °C berturut-turut sebesar -0,725; -0,581 dan -0,283 kJ/mol. Nilai entropi sebesar -0,0144 kJ/K mol dan merupakan adsorpsi fisik dengan nilai entalpi ( $\Delta H$ ) sebesar -5,092 kJ/mol.

**Kata kunci:** Zeolit-X, serat alam, CO<sub>2</sub>, adsorpsi-desorpsi, termodinamika

## KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas anugerah yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan tesis yang berjudul **“Sintesis Zeolit-X Berpendukung Serat Alam dengan Variasi Serat dan Waktu Aktivasi Serat untuk Adsorpsi-Desorpsi CO<sub>2</sub>”**.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dan memberikan dukungan dalam penyusunan tesis ini. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada:

1. Nurul Widiastuti, M.Si, Ph.D selaku dosen pembimbing atas semua bimbingan dan arahan dalam penyusunan tesis serta nasihat dan motivasi yang sangat berharga untuk terus mengembangkan potensi diri.
2. Dosen-dosen penguji atas arahan dan saran untuk penelitian ini.
3. Prof. Mardi Santoso, Ph.D, selaku Kaprodi Magister Kimia ITS.
4. Prof. Dr. Didik Prasetyoko, M.Sc, selaku Ketua Jurusan Kimia ITS.
5. Lukman Atmaja, Ph.D, selaku dosen wali atas semua arahan, nasihat dan bimbingannya.
6. Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) untuk kepercayaan dan kesempatan yang diberikan dalam bentuk beasiswa untuk melanjutkan studi ke program pascasarjana (S2).
7. Bapa Moses Lakapu, Mama Naema Lakapu-Henukh, kk Yaner, kk Nona, Yuli, Ory, Ezra atas semua bentuk dukungan yang menjadi insiprasi dan semangat bagi penulis untuk menyelesaikan studi S2.
8. K Zemry, K Santy, Bradly & Kevly untuk setiap dukungan dan motivasi yang sangat berharga bagi penulis.
9. Ivana, Jopa, k Andy dan teman-teman kimia fisik 2014 atas motivasi dan ilmu yang dibagikan sehingga melengkapi setiap kekurangan penulis selama perkuliahan, penelitian dan penyusunan tesis.
10. Tim peneliti di Laboratorium Basa, teman-teman S2 angkatan 2014 & 2015 serta awardee LPDP afirmasi NTT di ITS khususnya PK-10 yang telah mendukung baik dengan tenaga dan motivasi selama penulisan tesis.

11. Semua pihak yang telah membantu yang tidak mungkin penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam tesis ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan. Semoga tesis ini dapat bermanfaat baik bagi penulis maupun dalam pengembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, 02 Agustus 2016

Penulis



## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL.....</b>	<b>i</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN.....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>iv</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN.....</b>	<b>xiv</b>

### BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Batasan Penelitian.....	6

### BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Teknologi Penangkapan dan Penyimpanan Karbon dioksida (CO <sub>2</sub> )...	7
2.2 Adsorpsi CO <sub>2</sub> pada Material Berpori .....	9
2.3 Zeolit.....	10
2.4 Adsorpsi CO <sub>2</sub> Pada Zeolit Tipe Faujasit.....	12
2.4.1 Sintesis Zeolit-X .....	13
2.4.2 Zeolit-X Berpendukung Material Serat .....	15
2.5 Serat Alam .....	17
2.5.1 Komposisi Serat Alam .....	17
2.5.2 Perlakuan Awal Serat Alam .....	20
2.6 Metode Pengujian Adsorpsi - Desorpsi secara Gravimetri.....	21
2.7 Model Kinetika Adsorpsi.....	22
2.7.1 Orde satu semu.....	22



2.7.2	Orde dua semu .....	23
2.7.3	Difusi Intra Partikel .....	25
2.8	Pengukuran Sifat Termodinamika Adsorpsi CO <sub>2</sub> .....	26
2.9	Karakterisasi Padatan .....	27
2.9.1	Difraksi Sinar-X (XRD).....	27
2.9.2	<i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	29
2.9.3	<i>Atomic Force Microscopy</i> (AFM).....	30
2.9.4	<i>Thermal Gravimetry Analysis</i> (TGA).....	31
2.9.5	Adsorpsi Gas Nitrogen .....	32

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

3.1	Alat dan Bahan.....	37
3.1.1	Alat.....	37
3.1.2	Bahan.....	37
3.2	Prosedur Kerja.....	37
3.2.1	Preparasi Serat.....	37
3.2.2	Aktivasi Serat Alam.....	37
3.2.3	Sintesis Zeolit-X pada Permukaan Serat Alam.....	38
3.2.4	Karakterisasi Zeolit-X pada Permukaan Serat Alam Teraktivasi.	39
3.2.5	Penentuan Kapasitas Adsorpsi Gas CO <sub>2</sub> .....	39

### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

4.1	Pengaruh Waktu Aktivasi Serat Terhadap Kristalinitas Zeolit-X Berdukung Serat Alam.....	43
4.2	Pengaruh Jenis Serat Terhadap Kristalinitas Zeolit-X Berdukung Serat Alam.....	48
4.3	Analisis Termal Zeolit-X mendukung Serat Alam.....	53
4.4	Karakterisasi Pori Zeolit-X mendukung Serat Alam.....	55
4.5	Pengujian Kapasitas Adsorpsi-Desorpsi CO <sub>2</sub> Pada Zeolit-X Berdukung Serat Alam.....	58
4.6	Model Kinetika dan Termodinamika Adsorpsi.....	61

## **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

5.1	Kesimpulan.....	67
5.2	Saran.....	68
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>		<b>69</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>		<b>85</b>

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1	Skema metode penangkapan CO <sub>2</sub> . 7
Gambar 2.2	Pembentukan zeolit tipe faujasit 12
Gambar 2.3	Kerangka zeolit-X 14
Gambar 2.4	Sintesis zeolit secara Hidrotermal 15
Gambar 2.5	Struktur Serat alam 17
Gambar 2.6	Grafik model kinetika orde satu semu 23
Gambar 2.7	Grafik model kinetika orde dua semu 25
Gambar 2.8	Grafik model kinetika difusi intra molekul 25
Gambar 2.9	Grafik termodinamika adsorpsi 27
Gambar 2.10	Difraksi sinar X 28
Gambar 2.11	Difraktogram Sinar-X zeolit-X berpendukung serat gelas dengan variasi suhu hidrotermal dan lama reaksi 15 jam 29
Gambar 2.12	Foto SEM Morfologi partikel padatan hasil sintesis zeolit-X selama 15 jam pada suhu (A).110 °C dan (B). 130 °C 30
Gambar 2.13	Hasil AFM (a). CNF urea, (b). CNF mikroemulsi urea (c). LCNF urea, (d). LCNF mikroemulsi 31
Gambar 2.14	Kurva TGA alumina dengan dengan modikasi : (a). 1 g/mL PDDA; (b). 1 g/mL PDDA dengan kalsinasi; (c). 0,1 g/mL glukosa; (d). 0,001 g/mL PDDA (e). 0,001 g/mL PDDA dengan kalsinasi (f). alumina tanpa modifikasi 32
Gambar 2.15	Proses adsorpsi gas: (A). Gas mulai teradsop pada monolayer, (B). adsorpsi gas pada monolayer mencapai titik jenuh, (C). Gas mulai teradsorp pada multilayer 33
Gambar 2.16	Tipe grafik adsorpsi isothermal 34
Gambar 2.17	Kurva isoterm adsorpsi-desorpsi gas nitrogen ZXS-K4M 35
Gambar 2.18	Kurva isoterm adsorpsi-desorpsi gas nitrogen zeolit berpendukung material serat pada suhu 110 °C selama 15 jam 37
Gambar 3.1	Skema kerja pengukuran adsorpsi secara gravimetri saat proses <i>degassing</i> 43
Gambar 3.2	Skema kerja pengukuran adsorpsi secara gravimetri saat proses adsorpsi 43

Gambar 4.1	Difraktogram zeolit-X berpendukung serat alam, (a). zeolit-X, (b) aktivasi serat 12 jam , (c). aktivasi serat 18 jam, (d). aktivasi serat 24 jam, (e). aktivasi serat 30 jam dan (f). aktivasi serat 36 jam	44
Gambar 4.2	Reaksi delignifikasi lignin dari selulosa oleh NaOH	45
Gambar 4.3	Reaksi perubahan selulosa I ke selulosa II oleh NaOH	46
Gambar 4.4	Mikrograf AFM permukaan serat kapuk aktivasi dengan NaOH (a). tanpa aktivasi, (b). aktivasi 12 jam, (c). aktivasi 24 jam dan (d). aktivasi 36 jam	47
Gambar 4.5	Pola difraksi zeolit-X pengaruh serat pendukung : (a). Zeolit-X tanpa serat, (b). serat kapas, (c). serat kapuk dan (d). serat nanas	49
Gambar 4.6	Kristalinitas relatif zeolit-X berpendukung serat alam dengan variasi serat dan waktu aktivasi	49
Gambar 4.7	Mikrograf AFM permukaan serat alam yang diaktivasi dengan NaOH (a). Serat kapas, (b). Serat kapuk, (c). Serat nanas.	51
Gambar 4.8	Mikrograf SEM fasa zeolit pada permukaan serat alam dengan variasi Jenis serat: (a) Kapas; (b). Kapuk dan (c). Nanas	52
Gambar 4.9	Kurva TGA(—) dan DTG (----) dari (a). ZX-Kapas , (b). ZX-Kapuk dan (c). ZX-Nanas	53
Gambar 4.10	Kurva Isoterm Adsorpsi – Desorpsi gas nitrogen (a). Zeolit-X tanpa serat, (b). ZX-Kapas, (c). ZX-Kapuk dan (d). ZX-Nanas	56
Gambar 4.11	Grafik adsorpsi CO <sub>2</sub> pada material zeolit-X berpendukung serat alam (tekanan 1 bar)	59
Gambar 4.12	Grafik desorpsi CO <sub>2</sub> pada material zeolit-X berpendukung serat alam (tekanan 1 bar)	59
Gambar 4.13	Kapasitas adsorpsi ZX-Nanas pada variasi suhu.	61
Gambar 4.14	Plot model kinetika orde satu semu pada variasi suhu adsorpsi	63
Gambar 4.15	Plot model kinetika orde dua semu pada variasi suhu adsorpsi	63
Gambar 4.16	Plot model difusi intra partikel pada variasi suhu adsorpsi	64

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Perbandingan tiga pendekatan utama teknologi penangkapan CO <sub>2</sub>	8
Tabel 2.2 Kapasitas adsorpsi CO <sub>2</sub> dari beberapa material	10
Tabel 2.3 Sifat zeolit bergantung dengan rasio Si/Al	11
Tabel 2.4 Aplikasi zeolit-X dan zeolit-Y sebagai adsorben CO <sub>2</sub>	13
Tabel 2.5 Perbandingan serat sintesis dan serat alam sebagai pendukung material	16
Tabel 2.6 Sifat-sifat beberapa serat yang menjadi material pendukung	19
Tabel 2.7 Komposisi kimia serat nanas pada metode ekstraksi serat yang berbeda.	20
Tabel 2.8 Model kinetika adsorpsi pada material berpori.	26
Kristalinitas relatif zeolit-X berpendukung serat alam dengan variasi waktu aktivasi serat	45
Tabel 4.2 Persentase massa yang hilang pada suhu dekomposisi (%)	54
Tabel 4.3 Karakterisasi pori material zeolit-x berpendukung serat alam dan material zeolit-x tanpa pendukung serat	57
Tabel 4.4 Hubungan antara kapasitas adsorpsi-desorpsi terhadap kristalinitas dan rasio mikropori.	60
Tabel 4.5 Parameter model kinetika adsorpsi CO <sub>2</sub> oleh zx-nanas	64
Tabel 4.5 Hasil perhitungan termodinamika	65

## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
<b>LAMPIRAN A : SKEMA KERJA</b>	
1. Aktivasi Serat Alam dengan NaOH	85
2. Sintesis Zeolit-X Berpendukung Serat Alam	86
3. Uji Adsorpsi-Desorpsi CO <sub>2</sub>	87
<b>LAMPIRAN B : PERHITUNGAN SINTESIS ZEOLIT-X</b>	
1. Komposisi Bahan	88
2. Rasio Komposisi Molar Zeolit-X	88
3. Perhitungan Massa Yang Dibutuhkan pada Masing-Masing Bahan	88
<b>LAMPIRAN C : DATA DIFRAKTOGRAM XRD ZEOLIT-X BERPENDUKUNGAN SERAT ALAM</b>	
1. ZX-Kapas	91
2. ZX-Kapuk	94
3. ZX-Nanas	98
4. Zeolit-X	103
5. Kristalinitas Relatif	103
<b>LAMPIRAN D : DATA TGA-DTG</b>	
1. ZX-Kapas 24J	105
2. ZX-Kapuk 24J	105
3. ZX-Nanas 24J	105
<b>LAMPIRAN E : ADSORPSI-DESORPSI NITROGEN (BET)</b>	
1. Zeolit-X Tanpa Serat	106
2. ZX-Kapas	107
3. ZX-Kapuk	108
4. ZX-Nanas	109
<b>LAMPIRAN F : PERHITUNGAN ADSORPSI CO<sub>2</sub></b>	
1. Cara Perhitungan Kapasitas Adsorpsi CO <sub>2</sub> Secara Gravimetri	110
2. Kapasitas adsorpsi CO <sub>2</sub> pada Zeolit-X suhu 30 °C	110
3. Kapasitas adsorpsi CO <sub>2</sub> pada ZX-Kapas suhu 30 °C	111
4. Kapasitas adsorpsi CO <sub>2</sub> pada ZX-Kapuk suhu 30 °C	112
5. Kapasitas adsorpsi CO <sub>2</sub> pada ZX-Nanas suhu 30 °C	112
6. Kapasitas adsorpsi CO <sub>2</sub> pada ZX-Nanas suhu 40 °C	113

7. Kapasitas adsorpsi CO <sub>2</sub> pada ZX-Nanas suhu 50 °C	114
<b>LAMPIRAN G : PERHITUNGAN DESORPSI CO<sub>2</sub></b>	
1. Cara Perhitungan Kapasitas Desorpsi CO <sub>2</sub> Secara Gravimetri	116
2. Kapasitas Desorpsi CO <sub>2</sub> pada Zeolit-X	116
3. Kapasitas Desorpsi CO <sub>2</sub> pada ZX-Kapas	117
4. Kapasitas Desorpsi CO <sub>2</sub> pada ZX-Kapuk	118
5. Kapasitas Desorpsi CO <sub>2</sub> pada ZX-Nanas	119
<b>LAMPIRAN H : ANALISA DATA MODEL KINETIKA ADSORPSI</b>	
1. Model orde satu semu	120
2. Model orde dua semu	123
3. Model difusi intra-partikel	127
<b>LAMPIRAN I: ANALISA DATA TERMODINAMIKA</b>	
1. Penentuan Entalpi ( $\Delta H$ ) dan Entropi ( $\Delta S$ )	130
2. Penentuan Energi Bebas Gibbs ( $\Delta G$ )	131



# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) merupakan salah satu gas rumah kaca yang memberikan kontribusi sebesar 80% terhadap efek rumah kaca. Gas ini sebagian besar dikontribusi oleh aktifitas manusia yaitu sekitar 77% (Onat dkk., 2012 dan Songolzadeh dkk., 2014). Selama dua dekade efek rumah kaca ini menyebabkan peningkatan suhu rata-rata permukaan bumi  $0,8^\circ\text{C}$  dengan peningkatan konsentrasi  $\text{CO}_2$  diatmosfir dari 280 ppm menjadi 400 ppm hingga Mei 2013. Peningkatan konsentrasi  $\text{CO}_2$  diprediksikan akan mencapai 1550 ppm ditahun 2030 jika emisi gas  $\text{CO}_2$  diatmosfir tidak dikontrol (Leung dkk., 2014). Selain menyebabkan pemanasan global, gas karbon dioksida yang melebihi batas normal (350 ppm) dapat membahayakan kesehatan dan hujan asam yang membahayakan lingkungan. Karbon dioksida juga merupakan gas yang sangat penting bagi tanaman untuk proses fotosintesis, tetapi pada konsentrasi lebih dari 0,5% dapat menghambat penyerapan nutrisi pada tanaman dan membahayakan pertumbuhannya (Li dkk., 2013). Meskipun demikian,  $\text{CO}_2$  sangat diperlukan dalam industri petrokimia untuk memproduksi beberapa bahan kimia yang berguna seperti urea dan lain-lain (Songolzadeh dkk., 2012). Oleh karena itu, diperlukan suatu teknologi yang dapat mengontrol emisi  $\text{CO}_2$  di udara dan menyimpan  $\text{CO}_2$  untuk kebutuhan tersebut.

Teknologi yang saat ini banyak dikembangkan adalah *Carbon Capture and Storage* (CCS) yang merupakan metode penangkapan atau pemisahan karbondioksida dari udara dan menyimpannya. Metode ini dapat digunakan dalam berbagai industri (Jaschik dkk., 2007; Xu dkk., 2014 dan Wall dkk., 2007). Ada beberapa metode dalam CCS antara lain, absorpsi (Rajabzadeh dkk., 2009), destilasi kriogenik, membran dan adsorpsi (Keshavarz dkk., 2008 dan Zhang dkk., 2014). Metode absorpsi memiliki efisiensi yang tinggi ( $>90\%$ ), namun memerlukan biaya dan energi yang tinggi untuk proses regenerasi serta absorbennya sulit terdegradasi di lingkungan (Leung dkk., 2014). Metode destilasi kriogenik merupakan metode kondensasi yang membutuhkan suhu rendah tanpa melibatkan

pelarut atau komponen lain, sehingga mudah diaplikasikan pada skala besar. Akan tetapi, metode ini membutuhkan energi yang tinggi dalam proses pendinginan CO<sub>2</sub> (Songolzadeh dkk., 2014). Begitupun dengan metode membran, meskipun memiliki selektivitas yang tinggi terhadap gas CO<sub>2</sub>, tetapi membutuhkan biaya dan energi yang tinggi untuk pembuatan dan regenerasi membran pada skala yang besar (Pires dkk., 2011).

Salah satu metode CCS dengan penggunaan energi dan biaya yang rendah untuk proses pemisahan CO<sub>2</sub> adalah metode adsorpsi. Metode adsorpsi memiliki laju kinetika adsorpsi dan desorpsi yang tinggi, sehingga adsorbennya mudah diregenerasi dan memiliki stabilitas mekanik serta kapasitas adsorpsi yang tinggi pula terhadap CO<sub>2</sub> (Hedin dkk., 2013). Proses adsorpsi ini dibagi menjadi 2 yaitu adsorpsi kimia (kemisorpsi) dan adsorpsi fisika (fisisorpsi). Pada adsorpsi kimia terjadi reaksi kimia pada permukaan adsorben, sehingga sulit untuk diregenerasi, sedangkan adsorpsi fisika, adsorbat terikat pada permukaan adsorben oleh gaya *Van der Waals* sehingga mudah diregenerasi (Wang dkk., 2011 dan Yu dkk., 2012)

Material berpori yang sangat luas digunakan sebagai adsorben untuk proses fisisorpsi adalah zeolit. Zeolit adalah mineral kristal alumina silikat berpori terhidrat yang mempunyai struktur kerangka tiga dimensi terbentuk dari tetrahedral [SiO<sub>4</sub>]<sup>4-</sup> dan [AlO<sub>4</sub>]<sup>5-</sup>. Kedua tetrahedral ini dihubungkan oleh atom-atom oksigen yang menghasilkan struktur tiga dimensi terbuka dan berongga dengan ukuran pori 0,5-1,2 nm, sehingga material ini memiliki luas permukaan spesifik, stabilitas dan selektifitas yang tinggi terhadap gas CO<sub>2</sub> yang memiliki ukuran pori 0,33 nm (Jhonson dkk., 2014; Liu dkk., 2014; Sumin dkk., 2009; Yi dkk., 2012 dan Zhou dkk., 2014). Secara umum, zeolit terdiri atas 2 kelompok berdasarkan asalnya yaitu zeolit alam dan zeolit sintesis. Zeolit sintesis lebih banyak dikembangkan sebagai adsorben karena lebih mudah dimodifikasi dengan biaya yang rendah dan memiliki distribusi pori yang seragam dengan tingkat kemurnian yang tinggi. Zeolit sintesis terdiri atas beberapa jenis yang dibedakan berdasarkan rasio silika aluminanya (Si/Al) yang menyebabkan perbedaan formula dan ukuran pori (Ackley dkk., 2002; Iyoki dkk., 2014; Konwar 2013; Ma dkk., 2014; Masika dkk., 2013 dan Zaarour dkk., 2014).

Zeolit-X merupakan salah satu zeolit sintesis yang digunakan sebagai material adsorben gas adalah. Zeolit-X ini merupakan zeolit tipe faujasit yang memiliki rasio Si/Al rendah dengan kapasitas adsorpsi dan desorpsi serta luas permukaan yang lebih tinggi di bandingkan dengan zeolit-A dan zeolit-Y (Hedin dkk., 2013; Khanday dkk., 2014 dan Widiastuti dkk., 2014). Zeolit-X (NaX) memiliki ukuran pori 0,36 nm (Pillai dkk., 2012), sehingga sangat selektif terhadap adsorpsi gas CO<sub>2</sub> dengan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> mencapai 4,44 mol/kg dan laju adsorpsi 8,23 mol/s. Pada isotherm Langmuir zeolit-X sebagai adsorben gas CO<sub>2</sub>, memiliki nilai  $q_m$  (kapasitas maksimum adsorpsi) sebesar 2,918 yang lebih tinggi dari zeolit Y ( $q_m = 1,454$ ) (Walton dkk., 2006 dan Yi dkk., 2012). Zeolit-X dapat disintesis dengan mudah dari sumber silika dan alumina menggunakan metode hidrotermal dengan kristalinitas optimum pada suhu relatif rendah antara 90 °C-100 °C (Jhonson dkk., 2014). Umumnya hasil sintesis zeolit-X berbentuk bubuk, sehingga menyebabkan proses adsorpsi dan desorpsi gas pada skala yang besar kurang praktis bila diaplikasikan. Oleh karena itu, zeolit sering dibuat dalam bentuk pelet atau bola untuk tujuan komersial dengan menambahkan material perekat anorganik (Siva dkk., 2015). Akan tetapi, penambahan perekat ini dapat memblokir sebagian dari sistem aktif pori zeolit, sehingga mengurangi kapasitas adsorpsi zeolit-X (Yu dkk., 2013).

Salah satu alternatif untuk mengatasi masalah ini tanpa menggunakan perekat anorganik adalah mensintesis zeolit pada material pendukung seperti serat. Zeolit berpendukung serat memiliki persentasi desorpsi 92,93% pada siklus pertama dan 87,03% pada siklus ke-lima (Li dkk., 2012). Selain mempermudah proses desorpsi, zeolit berpendukung serat memiliki kekuatan mekanik dan stabilitas termal yang tinggi (Liu dkk., 2014) serta lebih fleksibel, sehingga hasil sintesis dapat dibuat dalam berbagai bentuk sesuai aplikasinya (Chandramohan dkk., 2011; Ji dkk., 2012; dan Rella dkk., 2013). Serat yang banyak digunakan sebagai material pendukung zeolit untuk adsorpsi CO<sub>2</sub> adalah serat gelas. Hasil sintesis zeolit-X berpendukung serat gelas memiliki kristalinitas 53,60% dan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> 6,52% pada suhu 29 °C (Devianti, 2014; Puspita, 2015; Tyastari, 2015 dan Wardani 2014). Akan tetapi, serat gelas memiliki kekurangan yang sangat serius yaitu kurang biodegradabel, biaya dan energi produksi serat yang

tinggi bahkan menghasilkan emisi CO<sub>2</sub> pada saat produksi serat (Candramohan dkk., 2011; Demir dkk., 2006; Dicker dkk., 2014; Kabir dkk., 2011 dan Mitra dkk., 2014).

Penelitian tentang serat alam sebagai material pendukung saat ini sedang dikembangkan karena dapat diperoleh secara alami dan ramah lingkungan. Selain itu, serat alam memiliki massa jenis yang rendah, mudah diperbaharui dan mampu mengurangi emisi CO<sub>2</sub> pada saat produksi serat alam selama proses fotosintesis (Cheung dkk., 2009; Mahmuda dkk., 2013; Milanese dkk., 2011; Pickering dkk., 2015; Rokbi dkk., 2011; Scarponi dkk., 2015; Syafiibab dkk., 2010; Thomason dkk., 2014; Wetsman dkk., 2010; Yimer dkk., 2013 dan Zhiros dkk., 2011). Sifat dan kekuatan mekanik yang tinggi dari serat alam ditentukan oleh kadar selulosa yang dimiliki serat alam tersebut. Oleh karena itu, kadar selulosa dalam serat tersebut menjadi pertimbangan untuk dijadikan material pendukung (Mulyawati dkk., 2012 ; Zheng dkk., 2014). Beberapa serat alam yang memiliki potensi lahan produksi yang besar di Indonesia (Syakir dkk., 2011) dengan kadar selulosa tinggi dan telah digunakan sebagai material pendukung antara lain serat kapas (*Gossypium hirsutum* L.) dengan kadar selulosa 90% (Alomayri dkk., 2013; Calabia dkk., 2013; Gamal dkk., 2010; Kamath dkk., 2005; Qu dkk., 2009 dan Tissera dkk., 2015), kapuk (*Ceiba petandra* B.) dengan kadar selulosa 64% (Prachayawarakorn dkk., 2013; Sarifudin dkk., 2013; Zheng dkk., 2012 dan Zheng dkk., 2015) dan nanas (*Ananas comosus* L.) dengan kadar selulosa 81% (Liu dkk., 2005; Mangal dkk., 2003; Mokhtar dkk., 2007; Neto dkk., 2015 dan Nizmah dkk., 2010).

Perlakuan kimia terhadap serat alam sebelum digunakan sebagai material pendukung zeolit-X perlu dilakukan untuk mengoptimalkan efisiensinya. Hal ini disebabkan oleh adanya kandungan hemiselulosa dan lignin dengan fasa amorf selain selulosa yang dapat menurunkan sifat mekanik dan stabilitas termal serat serta efektifitas pertumbuhan kristal zeolit-X dipermukaan serat (Dorez dkk., 2014; Kabir dkk., 2011 dan Supri dkk., 2009). Modifikasi ini dapat berpengaruh secara langsung terhadap struktur dan komposisi kimia serat yang dapat menghasilkan sifat mekanik dan termal yang lebih baik (Witono dkk., 2014). Perlakuan kimia yang saat ini dikembangkan adalah perlakuan asam (HCl) dan perlakuan alkali (NaOH). Akan tetapi perlakuan asam dapat menurunkan sifat mekanik dan terjadi

distorsi pada permukaan serat (Shalwan dkk., 2013), sehingga perlakuan alkali (NaOH) lebih banyak digunakan saat aktivasi serat alam (Abiola dkk., 2014; Faruk dkk., 2012; Nagib dkk., 2015; Putra 2012; Witono dkk., 2014 dan Zheng dkk., 2014).

Perlakuan alkali yang semakin lama akan menurunkan sifat mekanik serat alam karena rusaknya struktur serat oleh NaOH (Biljana dkk., 2008). Hal ini dipengaruhi oleh kadar komposisi kimia serat alam tersebut (Nagib dkk., 2015 dan Putera, 2012). Penelitian yang telah dilakukan sebelumnya terhadap beberapa serat alam sebagai material pendukung menunjukkan bahwa setiap serat alam yang mendukung material tertentu akan memiliki kondisi waktu optimum tertentu pula terhadap perlakuan alkali (Kabir dkk., 2011). Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan dioptimasi lama aktivasi NaOH pada serat kapas, kapuk dan nanas sebagai material pendukung zeolit-X untuk mengadsorbsi gas CO<sub>2</sub>. Selain itu, akan dipelajari beberapa sifat termodinamika meliputi entalpi, energi bebas Gibbs, entropi dan model kinetika adsorpsi dengan variasi suhu untuk mengamati laju adsorpsi dan mengetahui karakteristik adsorpsi CO<sub>2</sub> pada zeolit-X berpendukung serat alam.

## **1.2 Perumusan Masalah**

Permasalahan dalam penelitian ini adalah belum diketahui waktu aktivasi optimum terhadap serat kapas /*Gossypium hirsutum* L., kapuk/*Ceiba petandra* B., dan nanas/*Ananas comosus* dengan NaOH dan zeolit-X berpendukung serat alam yang efektif dalam proses adsorpsi-desorpsi CO<sub>2</sub> dari ketiga jenis serat alam yang digunakan. Selain itu, model kinetika dan sifat termodinamika seperti entalpi, energi bebas gibs dan entropi adsorpsi CO<sub>2</sub> pada zeolit-X berpendukung serat alam belum diketahui.

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui waktu aktivasi optimum terhadap serat kapas /*Gossypium hirsutum* L., kapuk/*Ceiba petandra* B., dan nanas/*Ananas comosus* dengan NaOH, sehingga diperoleh zeolit-X berpendukung serat alam

dengan kristalinitas yang tinggi dan mengetahui jenis serat alam yang efektif sebagai material pendukung zeolit-X untuk adsorpsi-desorpsi CO<sub>2</sub>. Selain itu, akan dipelajari model kinetika dan diukur beberapa sifat termodinamika seperti entalpi, energi bebas gibs dan entropi adsorpsi CO<sub>2</sub> pada zeolit-X berpendukung serat alam yang memiliki kapasitas adsorpsi gas CO<sub>2</sub> tertinggi.

#### **1.4 Batasan Penelitian**

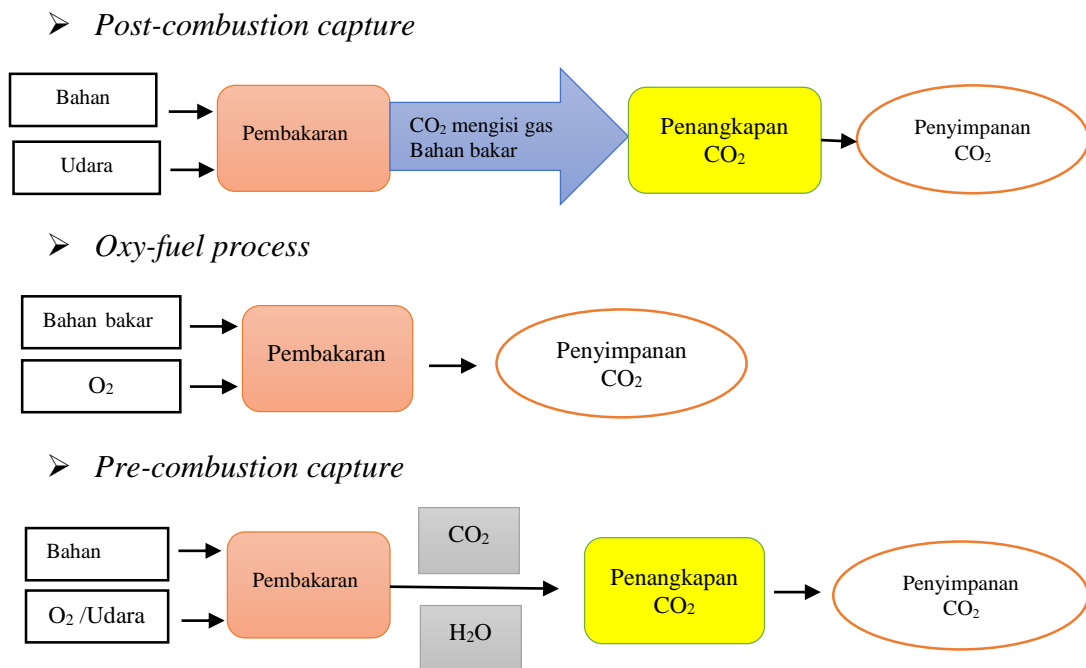
Serat alam yang digunakan pada penelitian ini meliputi serat kapas (*Gossypium hirsutum* L.), kapuk (*Ceiba petandra* B.) dan nanas (*Ananas comosus* L.). Konsentrasi NaOH yang digunakan untuk aktivasi adalah 4M dengan variasi waktu perendaman 12 jam, 18 jam, 24 jam, 30 jam dan 36 jam. Material zeolit-X berpendukung serat alam yang dihasilkan diuji kapasitas adsorpsi-desorbpinya terhadap gas CO<sub>2</sub> pada berat adsorben dan kondisi adsorpsi tertentu. Studi termodinamika dan model kinetika adsorpsi dilakukan dengan variasi suhu 30 °C, 40 °C dan 50 °C pada tekanan 1 bar .

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Teknologi Penangkapan dan Penyimpanan Karbon dioksida (CO<sub>2</sub>)

Penangkapan dan penyimpanan karbon (*Carbon Capture and Storage / CCS*) adalah teknologi yang dikembangkan untuk mengurangi emisi CO<sub>2</sub> dari pembakaran bahan bakar fosil ke atmosfer. Terdapat tiga tahapan dasar dari teknologi CCS yaitu pemisahan CO<sub>2</sub>, transportasi dan penyimpanan. Selain itu, terdapat juga tiga pendekatan teknologi CCS yaitu : *post-combustion capture*, *oxy-fuel process* dan *pre-combustion capture*. Secara skematik dapat diberikan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Skema metode penangkapan CO<sub>2</sub> (Li dkk., 2012)

Masing-masing metode ini memiliki kelebihan dan kekurangan yang dapat dilihat dalam Tabel 2.1. Berdasarkan Tabel 2.1, metode yang banyak dikembangkan adalah metode *Post-combustion* karena memiliki efisiensi harga yang lebih baik dan memiliki target pengurangan CO<sub>2</sub> hingga 2020 sebesar 12%



dimana target ini lebih besar dibandingkan dengan 2 metode lainnya yang hanya berkisar 5-8% (Florin dkk., 2010).

Tabel 2.1 Perbandingan tiga pendekatan utama teknologi penangkapan CO<sub>2</sub>

Teknologi penangkap CO <sub>2</sub>	Kelebihan	Kelemahan
<i>Pre-combustion</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Menghasilkan gas sintetik (<i>syngas</i>) CO dan hidrogen (Songolzadeh dkk., 2014).</li> <li>✓ Menghasilkan CO<sub>2</sub> dengan konsentrasi yang tinggi</li> <li>✓ . (Pires dkk., 2011)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Suhu operasinya terbatas, biaya modal yang tinggi karena penerapannya hanya untuk unit yang masih baru (Kumar dkk., 2013)</li> <li>✓ Membutuhkan biaya yang tinggi khususnya dalam proses pemisahanN (Pires dkk., 2011)</li> </ul>
<i>Post-combustion</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Metodenya kompatibel tanpa memerlukan perubahan substansial dan konsentrasi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan tinggi (Herzog dkk., 2009).</li> <li>✓ Lebih mudah diterapkan karena tidak mengubah siklus yang sudah ada (Wang dkk., 2011)</li> <li>✓ Tidak membutuhkan teknologi yang mahal dan biaya operasionalnya lebih murah dibandingkan dengan 2 metode lainnya dan memiliki efisiensi termal yang tinggi (Gibbins dkk., 2008 ; Songolzadeh dkk., 2014).</li> </ul>	Membutuhkan energi cukup tinggi saat menggunakan metode membran (Florin, 2010).
<i>Oxy-fuel Combustion</i>	Pemisahannya mudah karena hasil akhirnya hanya CO <sub>2</sub> dan H <sub>2</sub> O dan Konsentrasi H <sub>2</sub> O yang dihasilkan tinggi yaitu 80% v/v.	Membutuhkan O <sub>2</sub> yang murni, sehingga dibutuhkan biaya operasional yang sangat tinggi dibandingkan dengan 2 metode lainnya. (Florin dkk., 2010; Herzog dkk., 2009; Songolzadeh dkk., 2014).

*Post-combustion* memiliki beberapa metode yang digunakan antara lain absorpsi (fisisorpsi dan kemisorpsi), adsorpsi (fisisorpsi dan kemisorpsi), kriogenik dan membran. Proses absorpsi memiliki kapasitas dan selektivitas yang tinggi, namun memiliki kelemahan yaitu memiliki laju korosi dan konsumsi energi yang tinggi baik pada tahap penangkapan CO<sub>2</sub> maupun pada saat regenerasi, sangat bergantung pada suhu dan tekanan. Pada tekanan rendah dapat bersifat reversibel, sehingga tidak cocok untuk *Post-combustion*. Metode kriogenik merupakan metode yang mudah dibuat karena tidak menggunakan pelarut atau komponen-komponen lain dan dapat diterapkan dalam skala industri. Namun, dalam operasinya dilakukan pada suhu yang sangat rendah yaitu 195,5 K, sehingga membutuhkan energi yang sangat besar. Proses ini mengonsumsi energi sekitar 541-1119 kJ/kg CO<sub>2</sub>. Metode membran merupakan metode yang sederhana dan mudah dikontrol. Namun memiliki kelemahan yaitu membutuhkan energi yang tinggi, karena CO<sub>2</sub> memiliki tekanan parsial yang rendah dan selektifitas terhadap pemisahan CO<sub>2</sub> dari SO<sub>x</sub> dan NO<sub>x</sub> sangat rendah. Metode yang tepat untuk mengurangi konsumsi energi dan penggunaan biaya dalam operasi penangkapan atau pemisahan CO<sub>2</sub> dalam metode *Post-combustion* adalah metode adsorpsi (Songolzadeh dkk.,2014). Pada adsorpsi, selektifitas dan kapasitas adsorpsi ditentukan oleh struktur pori dan permukaan adsorben, sehingga pada tekanan yang rendah tidak dibutuhkan tambahan energi (Tseng dkk., 2014).

## **2.2 Adsorpsi CO<sub>2</sub> pada Material Berpori**

Adsorpsi adalah peristiwa penyerapan pada lapisan permukaan atau antar fasa. Materi atau partikel yang diadsorpsi disebut adsorbat, sedangkan bahan yang berfungsi sebagai pengadsorpsi disebut adsorben (Ardiansah dkk., 2012). Proses adsorpsi secara umum diklasifikasikan dalam dua jenis yaitu adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia. Adsorpsi fisika disebabkan oleh gaya Van der Waals dan gaya elektrostatik antara molekul adsorbat dan atom-atom yang menyusun permukaan adsorben. Adsorpsi fisika bersifat reversibel, sehingga bila tekanan diturunkan akan terjadi desorpsi gas. Adsorpsi kimia terjadi karena adanya ikatan kovalen antara adsorbat dengan adsorben. Adsorpsi kimia bersifat cenderung ireversibel, sehingga diperlukan suhu yang tinggi untuk mendesorpsi gas-gas yang teradsorpsi dan

memerlukan biaya yang tinggi saat regenerasi. Oleh karena itu, proses adsorpsi fisika lebih tepat untuk mengadsorpsi CO<sub>2</sub> (Zulfa dkk., 2011 dan Tseng dkk., 2014)

Saat ini sebagian besar adsorben yang banyak digunakan untuk fisisorpsi gas CO<sub>2</sub> adalah karbon aktif, material berpori anorganik seperti zeolit dan *material organic framework* (MOF). Kapasitas adsorpsi dari masing-masing adsorben ini dapat dilihat dalam Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> dari beberapa material.

Adsorben	Suhu Operasi (K)	Tekanan Operasi (kPa)	Kapasitas adsorpsi CO <sub>2</sub> (mol CO <sub>2</sub> /kg adsorben)
Karbon aktif	303	110	1,58
MOF	298	4545	33,50
Zeolit	323	101,32	2,14

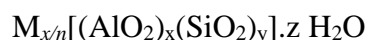
Sumber : Songolzadeh dkk., 2014

Berdasarkan Tabel 2.2 dapat dilihat bahwa MOF memiliki kapasitas yang paling tinggi. Akan tetapi, tekanan operasi MOF sangat besar, sehingga dibutuhkan energi dan biaya yang tinggi untuk proses adsorpsi dan desorpsi gas. Zeolit memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi daripada karbon aktif. Hal ini karena zeolit memiliki selektifitas terhadap CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> lebih baik daripada material karbon. Zeolit juga memiliki distribusi pori yang sama dengan ukuran CO<sub>2</sub>, distribusi pori karbon 0,7-2 nm sedangkan distribusi pori zeolit 0,3-0,7 nm. Selain itu, zeolit memiliki ukuran pori yang lebih seragam dibandingkan dengan karbon, sehingga mampu menyerap molekul dengan diameter yang sama. Oleh karena itu, zeolit lebih dipilih sebagai material adsorben CO<sub>2</sub> (Jaschik dkk., 2014)

### 2.3 Zeolit

Zeolit merupakan material kristalin aluminosilikat, tersusun atas tetrahedral (SiO<sub>4</sub>)<sup>4-</sup> dan (AlO<sub>4</sub>)<sup>5-</sup> yang memiliki kerangka tiga dimensi dan pori berukuran mikro (0,3 nm–1,5 nm). Pori-pori yang dimiliki zeolit membuatnya memiliki luas permukaan yang besar. Ketika aluminium masuk ke dalam struktur silika, kerangka zeolit menjadi bermuatan negatif. Substitusi ion Si<sup>4+</sup> dengan ion Al<sup>3+</sup> ini mengakibatkan kerangka zeolit menjadi bermuatan negatif, sehingga diperlukan

*counterion* (kation) agar struktur zeolit tetap bermuatan netral. Secara kimia zeolit dapat ditulis dengan rumus empirik



Dimana  $n$  merupakan valensi dari kation  $M$ ;  $z$  merupakan jumlah molekul air per unit sel;  $x$  dan  $y$  merupakan jumlah total tetrahedral per unit sel (Gougazeh dkk., 2014).

Zeolit dibedakan atas 2 berdasarkan asalnya yaitu zeolit alam dan zeolit sintesis. Meskipun zeolit alam lebih murah namun dalam aplikasinya membutuhkan biaya operasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan zeolit sintesis. Selain itu, struktur dan sifat-sifat zeolit sintesis dapat direkayasa sesuai dengan yang dibutuhkan. Zeolit sintesis memiliki selektifitas yang tinggi terhadap suatu adsorbat karena memiliki ukuran pori yang lebih seragam dengan distribusi yang merata. Oleh karena itu, penggunaan zeolit sintesis lebih banyak dikembangkan saat ini (Ackley dkk., 2002 ; Kadja dkk., 2013 dan Michalev dkk., 2012).

Rasio silika alumina (Si/Al) dalam kerangka zeolit menunjukkan perbedaan sifat dari masing-masing zeolit tersebut (Barquist, 2009). Perbedaan sifat ini dapat dilihat dalam Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Sifat zeolit bergantung dengan rasio Si/Al.

Rasio Si/Al	Rendah	Tinggi
Dekomposisi	700	1300
Tidak stabil saat pH	Asam	Basa
Tingkat kebasahan	Hidrofilik	Hidrofobik

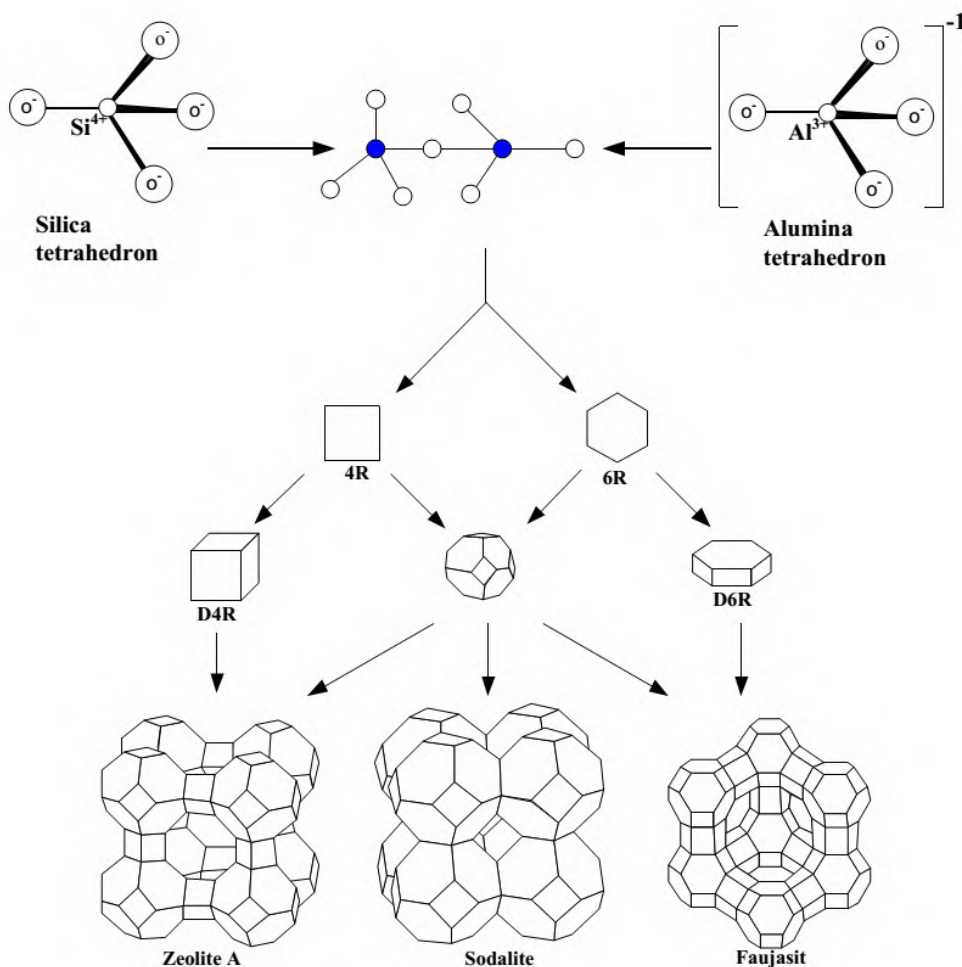
(Raimondo, 2012)

Zeolit dengan rasio Si/Al rendah memiliki konsentrasi kation tinggi, bersifat basa yang menyebabkan zeolit ini memiliki selektivitas tinggi terhadap gas  $CO_2$  karena gas  $CO_2$  bersifat asam lemah dan mempunyai sifat adsorpsi yang optimum karena hidrofilik. Sedangkan zeolit dengan rasio Si/Al tinggi bersifat hidrofobik, muatan yang rendah dan memiliki kasaman yang tinggi sehingga sangat kuat untuk menyerap molekul-molekul organik dan hanya sedikit bereaksi dengan air (Hedin dkk., 2013 ; Li dkk., 2013 dan Walton dkk., 2006).

Salah satu tipe zeolit yang memiliki rasio Si/Al rendah adalah faujasit disingkat menjadi FAU (Jhonson dkk., 2014). Selektivitas zeolit faujasit yang sangat tinggi terhadap gas CO<sub>2</sub> dalam campuran gas rumah kaca menyebabkan kapasitas adsorpsinya relatif besar.

## 2.4 Adsorpsi CO<sub>2</sub> Pada Zeolit Tipe Faujasit

Zeolit FAU (faujasit) memiliki struktur tiga dimensi dengan pori-pori yang saling tegak lurus satu sama lain. Zeolit jenis FAU ini memiliki diameter pori sekitar 8-10,8 Å dengan rumus umum  $[(Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+)_{29} (H_2O)_{240}] [Al_{58}Si_{134}O_{384}]$  (Baerlocher dkk., 2007 dan Jhonson dkk., 2014). Pembentukan zeolit Faujasit dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Pembentukan zeolit tipe faujasit (Masoudian dkk., 2013)

Zeolit yang memiliki kerangka FAU adalah zeolit-X dan Y. Zeolit tipe ini memiliki kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> relatif besar, yang dapat mencapai 4-6 mmol/g. Selain itu, kondisi saat adsorpsi CO<sub>2</sub> dapat dilakukan pada suhu ruang dan tekanan yang relatif rendah (Shao dkk., 2009).

Beberapa penelitian yang telah dilakukan untuk mengadsorpsi CO<sub>2</sub> menggunakan zeolit tipe faujasit dapat dilihat pada Tabel 2.4. Pada tabel tersebut dapat dilihat bahwa kemampuan adsorpsi CO<sub>2</sub> dengan zeolit tipe X baik yang dimodifikasi maupun tanpa modifikasi memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi daripada zeolit tipe Y. Hal ini karena dalam strukturnya, zeolit-X sangat atraktif dalam aplikasinya. Porinya yang berukuran mikro membuat zeolit X digunakan dalam proses pemurnian dan pemisahan gas-gas dan komponen organik lainnya (Ozdemir dkk., 2013). Zeolit-X memiliki rasio Si/Al antara 1 – 1,5, sedangkan zeolit Y memiliki rasio Si/Al yang lebih besar sekitar 1,5 dan 5,6. Oleh karena itu, zeolit-X memiliki adsorpsi CO<sub>2</sub> yang lebih optimum dibandingkan zeolit tipe Y (Raimondo dkk., 2012).

Tabel 2.4 Aplikasi zeolit-X dan zeolit-Y sebagai adsorben CO<sub>2</sub>

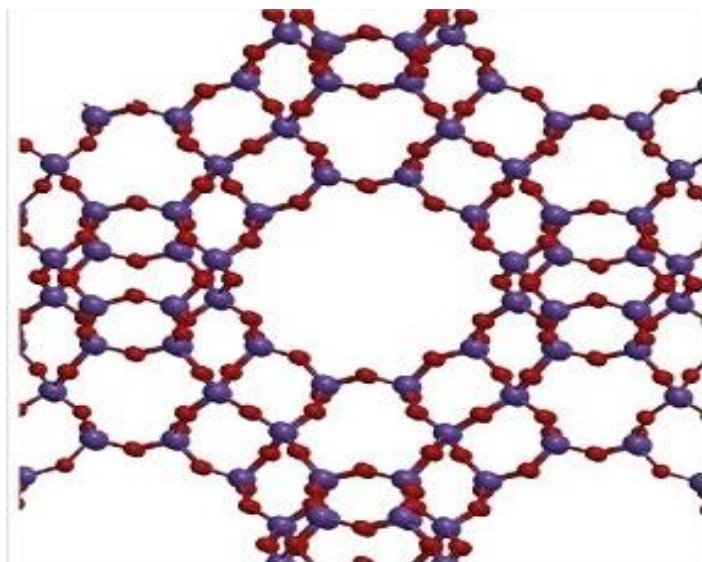
Zeolit Tipe Faujasit	Sifat Permukaan		Kondisi Adsorpsi		Kapasitas Adsorpsi CO <sub>2</sub> (mmol/g)	Gas	Pustaka
	Luas Permukaan (m <sup>2</sup> /g)	Volume Pori (cm <sup>3</sup> /g)	P (Bar)	T (°C)			
NaX	690	0,36	0,1	30	1,6	CO <sub>2</sub>	Pilai dkk., 2010
	534	0,29	0,6	50	1,2	CO <sub>2</sub>	Hedin dkk., 2013 dan Yi dkk., 2012
	527	0,36		25	4,98	CO <sub>2</sub>	Walton dkk., 2006
NaY	542	0,38	0,6	50	0,10	CO <sub>2</sub>	Yi dkk., 2012
	620	0,38		25	4,80	CO <sub>2</sub>	Walton dkk., 2006

#### 2.4.1 Sintesis Zeolit-X

Zeolit-X merupakan salah satu jenis zeolit yang biasa digunakan dalam pemisahan gas-gas karena memiliki rasio Si/Al yang rendah, sehingga menyebabkan zeolit-X memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi terhadap CO<sub>2</sub>

dibandingkan dengan zeolit-A dan zeolit-Y (Hedin dkk., 2013 dan Walton dkk., 2006). Kerangka zeolit-X dapat dilihat pada Gambar 2.3. Zeolit tipe ini dibuat dengan prekursor silika dan alumina dalam pelarut natrium hidroksida (Masoudian, dkk., 2013). Secara konvensional, zeolit disintesis melalui preparasi larutan gel aluminosilikat dan dikristalisasi secara hidrotermal dalam autoklaf pada suhu dan waktu tertentu. Sumber alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dan silika ( $\text{SiO}_2$ ) dicampur dan dilarutkan dalam larutan basa ( $\text{NaOH}$ ) untuk membentuk fasa gel. Suatu gel silika alumina akan terbentuk melalui reaksi kondensasi. Prosesnya dapat dilihat pada Gambar 2.4. Produk zeolit dengan struktur tertentu akan terbentuk pada suhu antara 100-350 °C (Jumaeri dkk., 2007 dan Nikmah dkk., 2009).

Hal yang perlu diperhatikan dalam sintesis zeolit-X adalah rasio Si/Al, waktu dan suhu hidrotermal karena akan berpengaruh pada struktur kristalin dan komposisi zeolit. Pada penelitian sebelumnya zeolit-X berhasil disintesis dengan komposisi molar zeolit-X yang baik adalah molar 4  $\text{Na}_2\text{O}$  : 0,2  $\text{Al}_2\text{O}_3$  :  $\text{SiO}_2$  : 200  $\text{H}_2\text{O}$  (Devianti, 2014), suhu dan waktu optimum hidrotermalnya adalah 100 °C selama 24 jam (Jhonson dkk., 2014 ; Puspita, 2015 dan Tyastari, 2015).



Gambar 2.3 Kerangka zeolit-X (Hedin dkk., 2013)





Gambar 2.4. Sintesis zeolit secara hidrotermal (Ozdemir dkk., 2013)

### 2.4.2 Zeolit-X Berpendukung Material Serat

Zeolit sintesis memiliki bentuk serbuk dengan ukuran partikel yang relatif kecil. Bentuk partikel zeolit seperti ini menjadikan zeolit sintesis tidak efisien dalam penggunaannya karena sukar untuk didesorpsi setelah proses adsorpsi (Ji dkk., 2012). Oleh karena itu, zeolit sintesis seringkali diubah bentuknya dalam bentuk pellet, tablet maupun granular dengan penambahan material perekat. Namun, penambahan material perekat dalam zeolit seringkali menurunkan efisiensi produk karena zeolit hasil sintesis harus dilarutkan bersama material perekat sebelum dibentuk, sehingga dapat menurunkan porositas dan aktifitas katalitik dari zeolit. Salah satu alternatif penyelesaian masalah tersebut adalah mensintesis zeolit menggunakan material pendukung sebagai pengganti material perekat. Penggunaan material pendukung juga dapat meningkatkan kekuatan mekanik, perpindahan panas dan aktivitas katalitik dari zeolit. Salah satu material pendukung yang dapat digunakan adalah serat. Material pendukung serat memiliki filament yang halus dan panjang serta memiliki kelebihan diantaranya sifatnya yang fleksibel, sehingga mudah dicetak dalam beberapa bentuk (Rella dkk., 2013). Selain itu, material pendukung serat juga diketahui sangat baik untuk media pendukung katalis karena memiliki kekuatan tensil yang tinggi dan lebih tahan lama (Chandramohan dkk., 2011).

Penelitian yang telah dilakukan terhadap zeolit ZSM-5 dalam proses katalitik menunjukkan bahwa zeolit ZSM-5 dengan material pendukung serat memiliki efisiensi katalisis yang lebih baik dibandingkan dengan zeolit dalam bentuk biasa atau serbuk. Zeolit ZSM-5 bermaterial pendukung serat memberikan

hasil 4,30% dan selektivitas 2,30% lebih tinggi daripada zeolit serbuk. Selain itu, zeolit ini juga memiliki stabilitas termal yang lebih tinggi karena memiliki kemampuan konversi 93,30% selama 60 jam pada suhu 625 °C (Liu dkk., 2014). Penelitian yang dilakukan oleh Li, dkk (2012) menunjukkan bahwa zeolit yang berkomposit serat dalam proses adsorpsi logam berat Cu (II) dan Ni (II) dari suatu larutan memiliki 10,68 m<sup>2</sup>/g luas spesifik area lebih tinggi daripada tanpa komposit. Zeolit berpendukung serat ini juga dapat dipisahkan dengan mudah setelah adsorpsi dan memiliki persentasi desorpsi 93,92% pada siklus pertama dan bahkan pada siklus yang ke-5 masih memberikan persentasi yang besar yaitu 87,03%. Oleh karena itu, serat memiliki peran yang penting dalam meningkatkan kinerja zeolit dalam proses adsorpsi maupun desorpsi zeolit.

Serat yang telah digunakan sebagai material pendukung berupa serat alam dan serat sintesis seperti serat gelas. Perbandingan kedua jenis serat dalam produksi dan penggunaannya dapat dilihat dalam Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Perbandingan serat sintesis dan serat alam sebagai pendukung material

	Serat		Pustaka
	Sintetik	Alam	
Massa Jenis (kg/m <sup>3</sup> )	1800-2600	600-1560	Dicker, dkk., 2006
Modulus Young's (Gpa)	70	4-85	Zsiros, dkk., 2010
Spesifik maodulus (Gpa)	26,9-34,4	3,3-81	Nirmal,dkk., 2014
Kekuatan tensil (Mpa)	200-3500	131-2000	Zsiros, dkk., 2010
% daur ulang	30	80	Naiman
Harga (\$/kg)	1,30-3,5	0,22-0,50	Joshi,dkk., 2004 ; Westman, dkk., 2010; Zsiros, dkk., 2010
Energi produksi (MJ/Kg)	54,8	9,7	Zsiros, dkk., 2010

Berdasarkan Tabel 2.5 serat sintetik memiliki massa jenis, elastisitas dan kekuatan tensil yang tinggi, tetapi dalam produksi dan aplikasinya memiliki kelemahan yaitu biaya produksi dan konsumsi energi yang tinggi, proses daur ulang yang rendah dan tidak ramah lingkungan karena sulit terdegradasi di lingkungan. Selain itu, produksi serat sintesis seperti serat gelas dapat menghasilkan CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> diudara dan emisi air seperti BOD, nitrit, dan fosfat yang tinggi. Oleh karena itu, penggunaan serat alam lebih menguntungkan dibandingkan serat sintesis

ditinjau dari aspek lingkungan maupun aspek ekonomisnya, baik saat produksi maupun saat diaplikasikan (Joshi dkk., 2004 dan Yimer dkk., 2013).

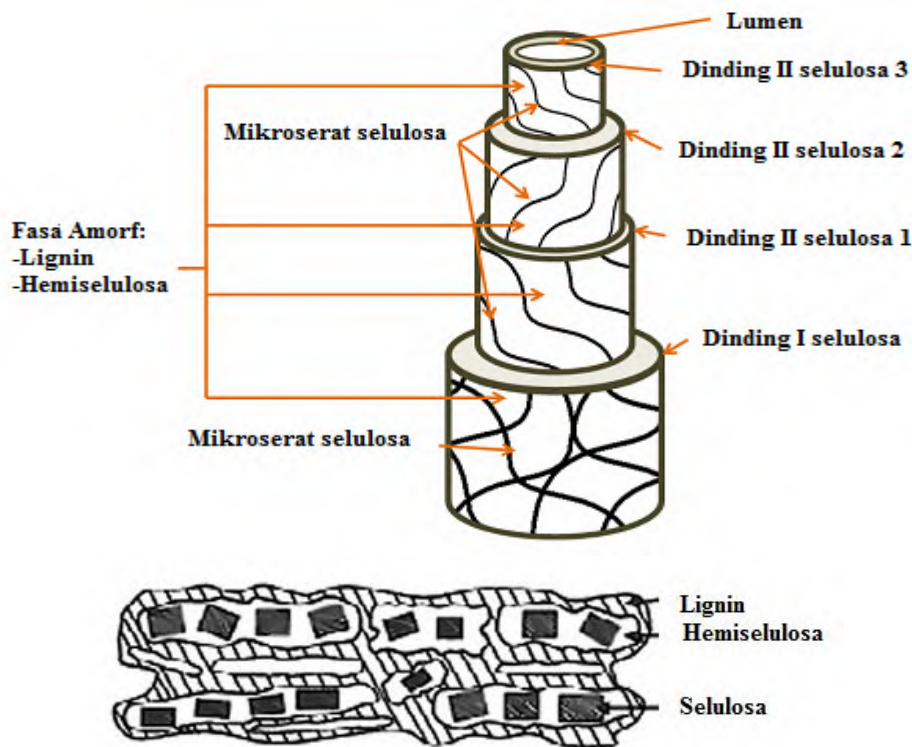
## **2.5 Serat Alam**

### **2.5.1 Komposisi Serat Alam**

Serat alam lebih dipilih dalam teknologi penangkapan CO<sub>2</sub> karena telah mengurangi CO<sub>2</sub> di alam sejak proses produksi serat. Hal ini karena serat alam lebih ringan, ekonomis, biodegradabel dan dapat diperbaharui dengan energi produksi yang rendah dan lebih efektif dalam mengadsorpsi CO<sub>2</sub> karena menggunakan CO<sub>2</sub> dan melepaskan oksigen ke lingkungan saat fotosintesis. (Chandramohan dkk., 2011; Demir dkk., 2006; Mahmuda dkk., 2013; Mitra dkk., 2014 dan Zhu dkk., 2013).

Komposisi serat alam terdiri atas 3 polimer yaitu selulosa, hemiselulosa dan lignin. Struktur bangunnya dapat dilihat pada Gambar 2.5. Selulosa berbentuk kristalin mikroserat yang tidak mudah terhidrolisis pada alkali kuat dan oksidator, bersifat hidrofilik dan memiliki ikatan kovalen. Hemiselulosa merupakan polisakarida yang berbentuk matriks amorf diantara mikroserat selulosa, bersifat hidrofilik dan dapat terhidrolisis pada suasana asam maupun basa. Lignin merupakan polimer kompleks hidrokarbon yang memberikan sifat kaku dan transpor air pada serat alam, bersifat hidrofobik tidak terhidrolisis pada suasana asam, larut dalam alkali dan mudah teroksidasi (Azwa dkk., 2013; Faruk dkk., 2012 dan Witono dkk., 2013).

Selulosa merupakan komponen yang menentukan sifat dari serat alam. Kandungan selulosa yang tinggi akan meningkatkan kekuatan dan stabilitas struktur serat. Oleh karena itu, kadar selulosa yang tinggi menjadi pertimbangan dalam pemilihan serat alam sebagai pendukung material (Mulyawati dkk., 2012 dan Zheng dkk., 2014). Komposisi polimer dan sifat serat-serat yang telah digunakan sebagai material komposit dapat dilihat pada Tabel 2.6. Berdasarkan Tabel 2.6 terdapat beberapa serat alam yang memiliki komposisi selulosa yang tinggi yang berpotensi menjadi material pendukung zeolit-X.



Gambar 2.5 Struktur serat alam (Abiola dkk., 2014 dan Azwa dkk.,2013)

Ketersediaan serat alam di Indonesia juga menjadi pertimbangan dalam menentukan material pendukung selain kandungan selulosa serat alam. Data Kementrian Pertanian Indonesia menunjukkan bahwa di tahun 2013 potensi kapas di Indonesia mencapai 8.738 hektar dengan produksi 3670 ton, sedangkan kapuk mencapai 157.283 hektar dengan produksi 61.273 ton. Meskipun Indonesia memiliki iklim yang cocok untuk budidaya kedua serat tersebut, namun selama 2 tahun terakhir produktivitas kapas dan kapuk mengalami penurunan hingga 23%. Hal ini disebabkan oleh kurangnya pemanfaatan serat kapas dan kapuk yang menurunkan permintaan akan kedua serat tersebut. Potensi nenas di tahun 2014 mencapai 15.616 hektar dengan produksi 1.835.483 ton. Potensi ini lebih besar dibandingkan dengan kapas dan kapuk. Bagian tanaman nanas yang sering dimanfaatkan adalah buahnya, sedangkan daunnya belum dimanfaatkan sepenuhnya dan menjadi limbah.

Tabel. 2.6 Sifat-sifat beberapa serat yang menjadi material pendukung

Jenis Serat	Massa Jenis (g/cm <sup>3</sup> )	Selulosa (%)	Hemiselulosa (%)	Lignin (%)	Kekuatan tarik (MPa)	Modulus Young (GPa)	Elongasi (%)	Kesetimbangan kelembaban (%)	Diameter (μm)	Pustaka
Sisal	1,33-1,45	47-78	10-24	7-11	468-700	9,4-38	1,9-15	11	50	Dicker dkk., 2014 ; Faruk dkk., 2012 ; Li dkk., 2007 ; Mwaikambo , 2006 ; Nirmal dkk., 2014; Rismawati, 2012 ; Siva dkk., 2015 ; Syafiisab dkk., 2010 ; Wijoyo dkk., 2012; Zsiros dkk., 2010
Ganja (Hemp)	1,47	57-77	14-22,4	3,7-13	550-900	70	0,8-3,0	9	25	
Pisang abaka	1,5	56-63	15-17	7-9	345-2000	31,1-33,6	1,2-1,5	15	800	
Lenan	1,5	71	18,6-20,6	2,2	340-1600	12-85	1,1-3,3	7	20	
Rami	1,4-1,5	68,6	5-16,7	0,6-0,7	200-1000	41-130	1,5-4	9	20-80	
Nenas	1,56	81	8,87	9,13	413-1627	34,5-82,5	8,199	13	98	
Serabut kelapa	1,15-1,46	43	1	45	131-220	4-6	14-30	10	10-460	
Bambu	1,5	26-65	30	5-30	500-757	27-40	1,9-3,2	8,9	100-400	
Yute	1,3-1,49	45-71,5	13,6-21	12-26	393-800	13-30	1,4-2,1	12	25	
Kapas	1,5-1,6	90	6	-	287-800	5,5-12,6	2,1-12,0	7,85-8,5	12	
Kenaf	0,6-1,5	31-57	13,6-21	15-19	223-1191	11-60	1,6-4,3	17	40-90	
Kapuk	0,38	64	29,63	20,73	93,3	4	1,2	10,9	15-35	
Enceng Gondok	1,4	25	33	10	6,35	4,7	0,8		15-65	

Limbah ini terdiri atas 90% daun, 9% tunas batang dan 1% batang (Mulyawati dkk., 2012). Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dimanfaatkan serat kapas, kapuk dan nenas sebagai material pendukung zeolit-X untuk meningkatkan produktivitas serat dan pemanfaatan limbah.

Serat kapas merupakan salah satu serat alam yang berasal dari tanaman kapas (*Gossypium hirsutum* L.). Serat ini tergolong serat primer karena diambil secara langsung dan termasuk tipe serat buah karena seratnya berasal dari buah kapas (Pramitasari dkk., 2013), begitu pula dengan serat kapuk (*Ceiba petandra* B.) (Abiola dkk., 2014 ; Azizah 2008 dan Faruk dkk., 2012). Penelitian yang telah dilakukan oleh Alomary dkk., (2013) menunjukkan bahwa kapas dapat menjadi material pendukung untuk material anorganik aluminasilika. Penambahan kapas 0,5% memberikan sifat mekanik yang optimum dibandingkan dengan material yang tanpa serat. Serat kapuk juga telah diaplikasikan sebagai adsorben untuk minyak dan logam berat seperti Cr (VI) (Hori dkk., 2000 ; Wang dkk., 2012 ; Zheng dkk., 2012 dan Zheng dkk., 2015

Serat nanas merupakan serat yang berasal dari tanaman nanas (*Ananas comosus* L.). Berdasarkan tipenya serat nanas termasuk tipe serat daun, sedangkan berdasarkan sumbernya serat ini tergolong serat sekunder karena diperlukan suatu tahap pengolahan untuk mengambil serat dari daun nanas (Abiola, dkk., 2014 ; Azizah dkk., 2008 dan Faruk dkk., 2012). Menurut Hidayat (2008), proses ekstraksi serat daun nanas dibedakan atas dua cara yaitu proses dekortikasi menggunakan mesin dekortikator dan proses *retting* dimana daun-daun nanas dimasukkan kedalam air dalam waktu tertentu kemudian dibersihkan dan dikeringkan. Perbandingan hasil kedua cara ini dapat dilihat dalam Tabel 2.7. Berdasarkan Tabel 2.7 maka proses ekstraksi serat nanas yang lebih baik adalah melalui proses *retting*.

Serat nanas telah dikompositkan dengan beberapa polimer yang menghasilkan material dengan kekuatan mekanik yang lebih baik. Penelitian yang dilakukan Nizmah dkk., (2010) menunjukkan bahwa dengan material pendukung serat nanas pada matriks *linear low density polyethylene* (LLDP) menghasilkan resin sifat mekanik lebih baik. Selain itu, serat nanas juga dapat menjadi material pendukung bagi asam polilaktik dan memberikan kekuatan mekanik mencapai 104 % lebih tinggi daripada polilaktik tanpa serat nenas (Kaewpirom dkk., 2014).

Tabel 2.7 Komposisi kimia serat nanas pada metode ekstraksi serat yang berbeda.

Komposisi Kimia	% Komposisi serat alam dengan metode	
	Dekortikasi	<i>Retting</i>
Selulosa	79,36	87,36
Hemiselulosa	13,07	4,58
Lignin	4,25	3,62
Kadar abu	2,29	0,54

Sumber : Hidayat, 2008

### 2.5.2 Perlakuan Awal Serat Alam

Perlakuan awal terhadap serat alam diperlukan untuk memperoleh material pendukung zeolit yang memiliki sifat mekanik. Hal ini ditandai dengan meningkatnya kadar selulosa serta berkurangnya pengotor-pengotor yang tidak diinginkan. Perlakuan awal ini dapat dilakukan dengan perlakuan alkali dan asam. Akan tetapi, perlakuan awal dengan asam (HCl) dapat menurunkan nilai mekanik serat karena selulosa mudah terhidrolisis dalam suasana asam dan tidak efektif dalam penghilangan lignin sebagai fasa amorf yang bersifat hidrofobik. Oleh karena itu, perlakuan awal dengan NaOH lebih banyak digunakan karena memberikan hasil pemisahan yang lebih baik karena mampu melarutkan lignin dan mereduksi kandungan air pada serat (Nagib dkk., 2015 ; Putera, 2012 ; Shalwan dkk., 2013; Witono dkk., 2014 dan Zheng dkk., 2015). Akan tetapi, semakin meningkat konsentrasi NaOH dan lama perendaman serat alam dapat menyebabkan kerusakan pada selulosa yang menyebabkan serat alam kurang optimal untuk menjadi material pendukung zeolit X. Oleh sebab itu, perlu di optimasi kondisi perlakuan awal terhadap serat alam yang akan digunakan yaitu konsentrasi NaOH dan lama perendaman (Pejic dkk., 2008 dan Putera, 2012).

### 2.6 Metode Pengujian Adsorpsi - Desorpsi secara Gravimetri

Kapasitas adsorpsi gas karbon dioksida dalam zeolit-X dapat diukur secara gravimetri melalui pengukuran massa sampel pada setiap perubahan tekanan CO<sub>2</sub>. Pengukuran secara gravimetri dinyatakan dalam % berat sesuai Persamaan (2.1).



$$\% CO_2 = \frac{(m_t - m_0)}{m_0} \times 100\% \quad (2.1)$$

Dimana ( $m_t$ ) adalah massa setelah adsorpsi dan ( $m_0$ ) massa awal

Proses desorpsi dilakukan langsung setelah proses adsorpsi mencapai kesetimbangan menggunakan pompa vakum. Massa akhir adsorpsi dicatat sebagai ( $m_0$ ) desorpsi dan pengurangan massanya dicatat tiap 1 menit hingga mencapai massa konstan. Massa konstan ini dicatat sebagai massa kesetimbangan desorpsi. Kapasitas desorpsi karbon dioksida dihitung dengan Persamaan (2.2).

$$\% CO_2 \text{ yang terdesorpsi} = \frac{\text{massa pada menit ke } - t}{\text{massa pada } t_0} \times 100\% \quad (2.2)$$

## 2.7 Model Kinetika Adsorpsi

Laju adsorpsi  $CO_2$  ke dalam zeolit-X berpendukung serat alam dapat diketahui dengan menentukan model kinetika adsorpsinya. Model kinetika adsorpsi gas yang sering digunakan berdasarkan adalah orde satu semu, orde dua semu dan model difusi intra-partikel (Ji dkk., 2012; Widiastuti dkk., 2011 dan Zhang dkk., 2014). Ketiga model kinetika tersebut diuji untuk menentukan model kinetika adsorpsi yang sesuai untuk adsorpsi zeolit-X berpendukung serat alam.

### 2.7.1 Orde Satu Semu

Model kinetika orde satu semu digunakan secara umum untuk menggambarkan laju adsorpsi yang ditentukan dengan Persamaan (2.3).

$$\frac{dq_t}{dt} = k_f(q_e - q_t) \quad (2.3)$$

Dengan  $q_t$  (mmol/g) adalah jumlah adsorbat yang diserap pada waktu  $t$  (menit),  $q_e$  (mmol/g) adalah kapasitas adsorpsi pada saat kesetimbangan dan  $k_f$  (menit<sup>-1</sup>) yaitu konstanta laju orde satu semu. Persamaan 2.3 dapat diintegrasikan dengan kondisi mula-mula  $q_t = 0$  saat  $t = 0$  dan  $q_t = q_t$  saat  $t = t$ , sehingga didapatkan persamaan 2.7 (Khan dkk., 2005; Tseng dkk., 2014; Tyastari 2015 dan Widiastuti dkk., 2011)

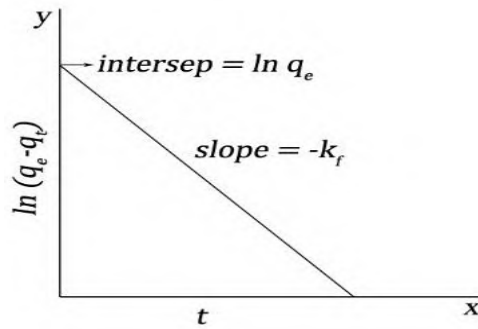
$$\int_0^{q_t} \frac{dq_t}{(q_e - q_t)} = \int_0^t k_f dt \quad (2.4)$$

$$-\ln(q_e - q_t)|_0^{q_t} = k_f t|_0^t \quad (2.5)$$

$$-\ln(q_e - q_t) + \ln(q_e - 0) = k_f(t - 0) \quad (2.6)$$

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_f t \quad (2.7)$$

Persamaan 2.7 digunakan untuk menggambarkan grafik model kinetika adsorpsi orde satu semu seperti Gambar 2.6. Plot dari  $\ln(q_e - q_t)$  dan  $t$  akan memberikan *slope* yang menunjukkan harga konstanta laju orde satu semu ( $k_f$ ).



Gambar 2.6 Grafik model kinetika orde satu semu (Delavar, 2012).

### 2.7.2 Orde Dua Semu

Model kinetika adsorpsi orde dua semu juga sering digunakan untuk menggambarkan laju adsorpsi gas (Tseng dkk., 2014). Persamaan 2.8 digunakan dalam perhitungan model kinetika adsorpsi orde dua semu.

$$\frac{dq_t}{dt} = k_s(q_e - q_t)^2 \quad (2.8)$$

Dimana  $k_s$  (g/mg menit) adalah konstanta laju orde dua semu,  $q_t$  (mg/g) adalah jumlah adsorbat yang diserap pada waktu  $t$  (menit),  $q_e$  (mg/g) adalah kapasitas adsorpsi kesetimbangan. Pada kondisi mula-mula  $q_t = 0$  saat  $t = 0$  dan  $q_t = q_t$  saat  $t = t$ , maka Persamaan 2.8 dapat diintegrasikan lebih lanjut hingga menghasilkan persamaan 2.17 melalui perhitungan berikut ini :

$$\int_0^{q_t} \frac{dq_t}{(q_e - q_t)^2} = \int_0^t k_s dt \quad (2.9)$$

Dimisalkan :  $u = q_e - q_t$ ,  $\frac{du}{dq_t} = -1$ ,  $dq_t = -du$

$$\int_0^{q_t} \frac{-du}{u^2} = \frac{1}{u} = \frac{1}{(q_e - q_t)} \Big|_0^{q_t} \quad (2.10)$$

$$\frac{1}{(q_e - q_t)} \Big|_0^{q_t} = k_s t \Big|_0^t \quad (2.11)$$

$$\frac{1}{(q_e - q_t)} - \frac{1}{(q_e - 0)} = k_s(t - 0) \quad (2.12)$$

$$\frac{1}{q_e - q_t} - \frac{1}{q_e} = k_s t \quad (2.13)$$

$$\frac{q_t}{q_e^2 - q_e q_t} = k_s t \quad (2.14)$$

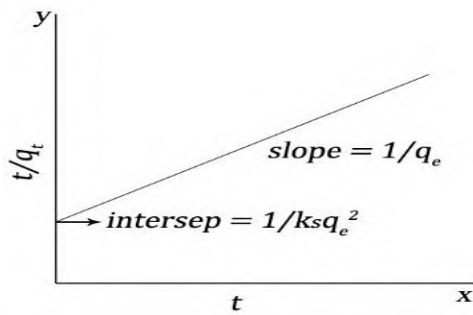
$$\frac{q_e^2}{q_t} - q_e = \frac{1}{k_s t} \quad (2.15)$$

$$\frac{q_e^2}{q_t} = \frac{1 + q_e k_s t}{k_s t} \quad (2.16)$$

Ruas kiri dan kanan dikalikan dengan  $t/q_e^2$  sehingga Persamaan 2.16 menjadi :

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_s q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (2.17)$$

Plot  $t/q_t$  dan  $t$  dari Persamaan 2.17 tersebut akan menghasilkan grafik model kinetika orde dua semu seperti Gambar 2.7. Harga konstanta laju adsorpsi orde dua semu ( $k_s$ ) dapat dihitung melalui intersep.



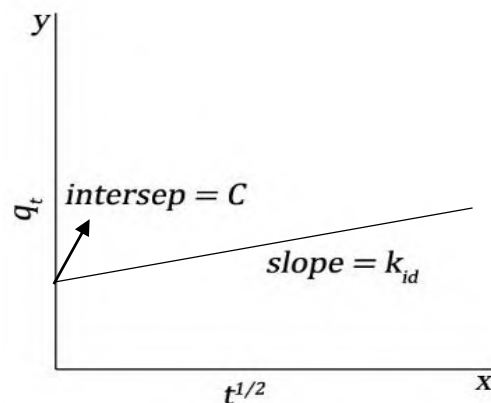
Gambar 2.7 Grafik model kinetika orde dua semu (Widiastuti dkk., 2011).

### 2.7.3 Difusi Intra Partikel

Model difusi intra-partikel digunakan untuk menentukan proses adsorpsi yang terjadi pada material berpori dan dinyatakan dalam Persamaan 2.18 (Delavar dkk., 2012 ; Khan dkk., 2005 dan Widiastuti dkk., 2011).

$$q_t = k_{id} t^{\frac{1}{2}} + C \quad (2.18)$$

$k_{id}$  ( $\text{mmol g}^{-1} \text{menit}^{-0.5}$ ) adalah konstanta laju difusi intra-partikel,  $t$  (menit) adalah waktu. Nilai  $C$  menyatakan ketebalan dari batas lapisan. Plot  $q_t$  dan  $t^{1/2}$  berdasarkan Persamaan 2.18 akan menghasilkan grafik model kinetika difusi laju partikel (Gambar 2.8). *Slope* yang dihasilkan dapat digunakan untuk menghitung konstanta laju difusi intra-partikel ( $k_{id}$ ).



Gambar 2.8 Grafik model kinetika difusi intra molekul (Delavar, 2012).

Tabel 2.8 Model kinetika adsorpsi pada material berpori.

Material berpori	Model kinetika adsorpsi	Kondisi adsorpsi		Pustaka
		T (°C)	P (bar)	
Kitosan berpendukung serat kapas	Orde dua semu	5	1	(Qu dkk., 2009)
		15		
		25		
		35		
Serat Kapas	Orde satu semu	40-90	1	(Gamal dkk., 2010)
Karbon nanotube	- Orde satu semu - Difusi intra partikel	10	1	(Delavar dkk., 2012)
		25		
		45		

## 2.8 Pengukuran Sifat Termodinamika Adsorpsi CO<sub>2</sub>

Proses adsorpsi dapat dikarakterisasi melalui penurunan total energi bebas dalam sistem tertutup. Parameter termodinamika adsorpsi gas CO<sub>2</sub> pada zeolit-X berpendukung serat alam berupa nilai entalpi ( $\Delta H$ ), entropi ( $\Delta S$ ) dan energi bebas Gibb's ( $\Delta G$ ) (Ugal dkk., 2013 dan Zhang dkk., 2014) dapat ditentukan menggunakan persamaan Van't Hoff sebagai berikut :

$$\frac{\Delta H}{RT^2} - \frac{\Delta S}{RT} = \left( \frac{\partial \ln P}{\partial T} \right)_q \quad (2.19)$$

Persamaan 2.19 dapat diintegrasi lebih lanjut hingga diperoleh Persamaan 2.20:

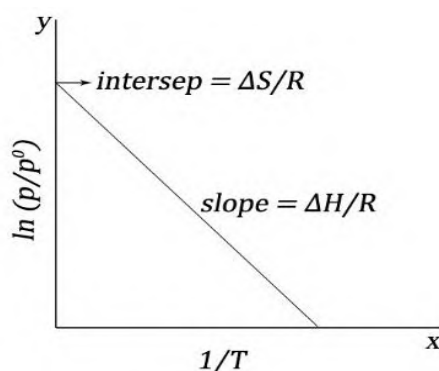
$$\ln \frac{P}{P^0} = \frac{\Delta H}{RT} - \frac{\Delta S}{R} \quad (2.20)$$

Dimana  $\Delta H$  adalah entalpi adsorpsi (kJ/mol), T adalah suhu (K), P adalah tekanan pada saat kesetimbangan (bar), q menunjukkan kesetimbangan kapasitas adsorpsi dan R adalah tetapan gas (8,314 J/mol K),  $\Delta S$  adalah entropi adsorpsi (J/mol K) (Svilovic dkk., 2007).

Entalpi dan entropi adsorpsi CO<sub>2</sub> dihitung dengan memplot grafik antara  $\ln P/P^0$  dengan  $1/T$ . *Slope* grafik menunjukkan harga dari  $\Delta H/R$ , sedangkan intersep akan menunjukkan harga  $\Delta S/R$  (Gambar 2.9), sehingga harga entalpi dan entropi adsorpsi CO<sub>2</sub> dapat dihitung. Parameter termodinamika berupa energi bebas Gibbs ( $\Delta G$ ) dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 2.21.

$$\Delta G_{ads} = -RT \ln K = \Delta H_{ads} - T\Delta S_{ads} \quad (2.21)$$

dimana  $K$  merupakan tetapan kesetimbangan yang bergantung pada suhu. Pada umumnya, harga tetapan  $K$  didapat dari persamaan isothermal Langmuir atau dapat dihitung dengan permodelan komputasi (Zhang dkk., 2014).  $R$  adalah tetapan gas (8,314 J/mol K),  $T$  adalah suhu (K),  $\Delta S_{ads}$  adalah entropi adsorpsi (J/mol K) (Delavar dkk., 2012).



Gambar 2.9 Grafik termodinamika adsorpsi (Delavar dkk., 2012).

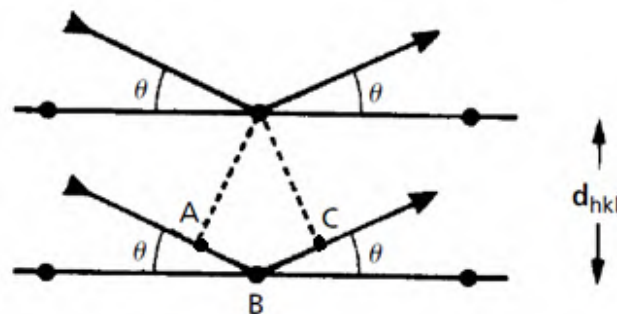
Harga entalpi dapat menentukan jenis adsorpsi yang terjadi, saat entalpi mencapai 80 kJ/mol atau lebih maka terjadi adsorpsi secara kimia (kemisorpsi) dan harga yang lebih kecil menunjukkan adsorpsi secara fisika (fisorpsi) (Delavar dkk., 2012). Entalpi adsorpsi standar ( $\Delta H$ ) yang bernilai positif juga menunjukkan bahwa reaksi berlangsung secara endotermis sehingga membutuhkan energi. Apabila harga entropi adsorpsi standar ( $\Delta S$ ) negatif menunjukkan bahwa adsorben memiliki keteraturan lebih tinggi sehingga tidak terjadi perubahan struktur sedangkan harga energi bebas Gibbs yang tinggi menunjukkan bahwa reaksi tersebut tidak berjalan spontan dan membutuhkan energy untuk terjadi adsorpsi (Gamal dkk., 2010; Ugal dkk., 2012 dan Svilovic dkk., 2007)

## 2.9 Karakterisasi Padatan

### 2.9.1 Difraksi Sinar-X (XRD)

Difraksi sinar-X merupakan teknik karakterisasi untuk memperoleh informasi tentang struktur kristal padatan, komposisi, dan keadaan material polikristalin. Prinsip dasar dari XRD adalah hamburan elektron yang mengenai permukaan kristal. Bila sinar dilewatkan ke permukaan kristal, sebagian sinar

tersebut akan dihamburkan dan sebagian lagi akan diteruskan. Sinar yang dihamburkan saling menguatkan (interferensi konstruktif) dan saling melemahkan (interferensi destruktif). Difraksi sinar X hanya akan terjadi pada sudut tertentu, sehingga akan menghasilkan suatu pola tertentu. Pengukuran kristalinitas relatif dilakukan dengan membandingkan intensitas puncak pada sudut tertentu antara sampel dan standar (Williard, 1988). Hukum Bragg diturunkan dengan mengacu pada Gambar 2.10 yang menunjukkan kristal sederhana dengan satu atom pada setiap titik kisi.



Gambar 2.10 Difraksi sinar X (Hammond, 2009)

Jalur yang berbeda antara gelombang dihamburkan oleh atom yang berdekatan bidang kisi dari jarak  $d_{hkl}$  ditunjukkan dengan Persamaan (2.22) yang merupakan persamaan Bragg.

$$n\lambda = (AB + BC) = 2d\sin\theta ; n = 1,2,\dots \quad (2.22)$$

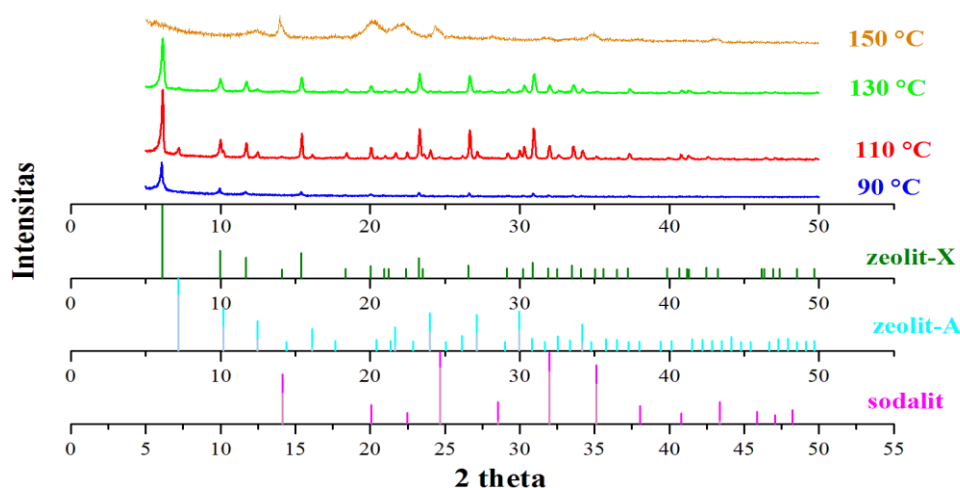
dimana  $\lambda$  adalah panjang gelombang sinar-X yang digunakan,  $d$  adalah jarak antara dua bidang kisi,  $\theta$  adalah sudut antara sinar datang dengan bidang normal, dan  $n$  adalah bilangan bulat yang disebut sebagai orde pembiasan.

Di dalam kisi kristal, tempat kedudukan sederetan ion atau atom disebut bidang kristal. Bidang kristal ini akan merefleksikan sinar X yang datang. Posisi dan arah dari bidang kristal ini disebut indeks miller. Setiap kristal memiliki bidang kristal dengan posisi dan arah yang khas, sehingga jika disinasi sinar X pada analisis XRD akan memberikan difraktogram yang khas pula. Dari data XRD yang diperoleh, dilakukan identifikasi puncak grafik XRD dengan cara mencocokkan

puncak yang ada dengan standar JCPDS (*Joint Committee Powder Diffraction Standar*).

Kegunaan dan aplikasi lain dari XRD adalah membedakan antara material yang bersifat kristal dengan amorf, penentuan dimensi-dimensi sel satuan, menentukan struktur kristal dengan menggunakan Rietveld refinement, dan analisis kuantitatif dari mineral. Pola difraksi sinar-X yang dihasilkan dari suatu material kristal adalah khas, tergantung pada struktur kristal dan atom-atom penyusunnya.

Penelitian yang dilakukan oleh Devianti (2014) menunjukkan bahwa pada suhu 90°C mulai terbentuk fasa-fasa spesifik zeolit-X. Hal ini ditandai dengan munculnya puncak spesifik pada  $2\theta$  6,23°; 10,08°; 16,04°; 21,68°; 23,80°; 27,23°; 29,80°; 30,00° dan 34,40°. Difraktogramnya dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11. Difraktogram Sinar-X Zeolit-X berpendukung serat gelas dengan variasi suhu hidrotermal dan lama reaksi 15 jam (Devianti, 2014)

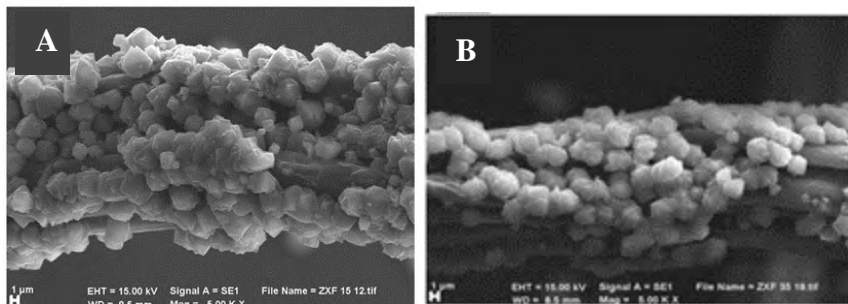
### 2.9.2 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Fungsi utama SEM (*Scanning Electron Microscopy*) adalah mengetahui morfologi permukaan dari sampel padat. *Scanning Electron Microscopy* (SEM) merupakan suatu instrumen yang digunakan untuk mengetahui struktur mikro suatu material meliputi tekstur dan morfologi permukaan material. Morfologi yang diamati dalam SEM berupa bentuk, ukuran dan susunan partikel. SEM merupakan suatu pencitraan material dengan prinsip mikroskopi.

SEM menggunakan elektron sebagai sumber pencitraan dan medan elektromagnetik sebagai lensanya (Hirscher dkk., 2009). Elektron diemisikan dari katoda (*electron gun*) melalui efek foto listrik dan dipercepat melalui anoda.



Filamen yang biasa digunakan adalah tungsten atau Lanthanum hexaboride ( $\text{LaB}_6$ ). *Scanning coil* akan mendefleksikan berkas elektron menjadi sekumpulan *array* (berkas yang lebih kecil) disebut *scanning beam* dan lensa obyektif (magnetik) akan memfokuskannya pada permukaan sampel (Hirscher dkk., 2009). Pada penelitian ini, SEM digunakan untuk mengetahui morfologi permukaan zeolit X yang disintesis pada serat alam. Morfologi hasil sintesis zeolit X berpendukung serat gelas dengan variasi suhu dapat dilihat pada Gambar 2.12. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa perbedaan suhu hidrotermal menyebabkan perbedaan morfologi permukaan serat yang ditumbuhi zeolit-X. Hasil hidrotermal dengan suhu 110 °C lebih baik dari pada hidrotermal dengan suhu 130 °C .



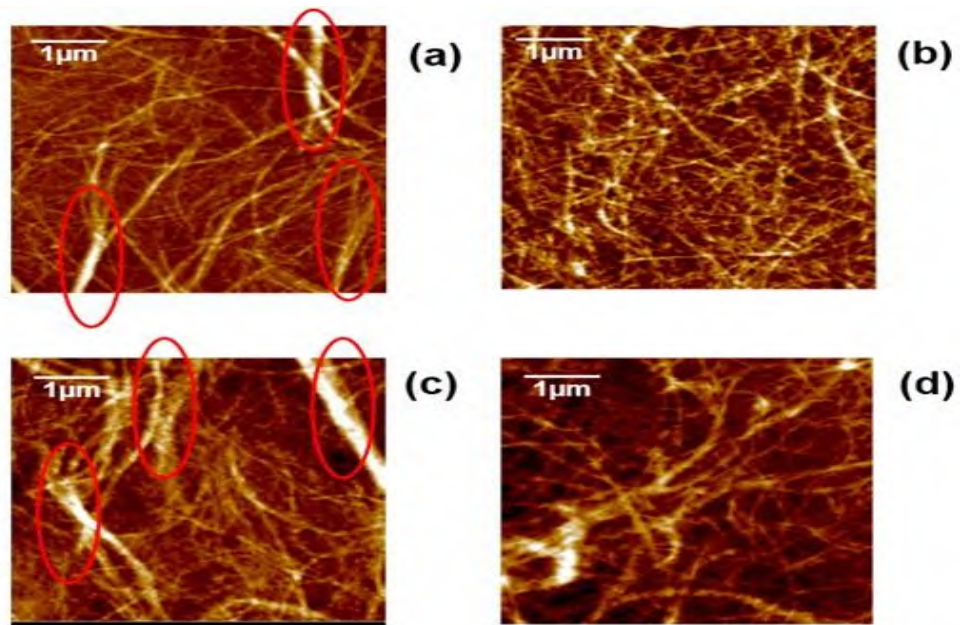
Gambar 2.12 Foto SEM Morfologi partikel padatan hasil sintesis Zeolit X selama 15 jam pada suhu (A). 110 °C dan (B). 130 °C (Devianti, 2014)

### 2.9.3. Atomic Force Microscopy (AFM)

*Atomic Force Microscopy* (AFM) dapat menunjukkan topografi permukaan dalam bentuk tiga dimensi (3D) dalam skala nanometer. Prinsip kerja AFM berdasarkan gaya interaksi antara atom dan molekul. Pada mikroskop ini terdapat sebuah jarum (*probe*) tajam pada AFM akan bergerak menyentuh permukaan suatu sampel pada jarak antara 0,2 – 10 nm (Paredes dkk., 2003). Gaya interaksi antara jarum (*probe*) dan permukaan suatu sampel akan terdeteksi oleh detektor yang akan diolah untuk menjadi bentuk tiga dimensi.

Penelitian yang dilakukan Carrillo dkk., (2014) untuk memproduksi selulosa nanoserat menyimpulkan bahwa perbedaan perlakuan awal dan adanya lignin berpengaruh terhadap mikrogram permukaan serat yang dihasilkan oleh AFM. Hasil mikrogram selulosa nanoserat bebas lignin (CNF/Cellulosa

Nanofiber) dan selulosa nanoserat yang lignin (LCNF/ Lignin Cellulosa Nanofiber) dapat Gambar 2.13.



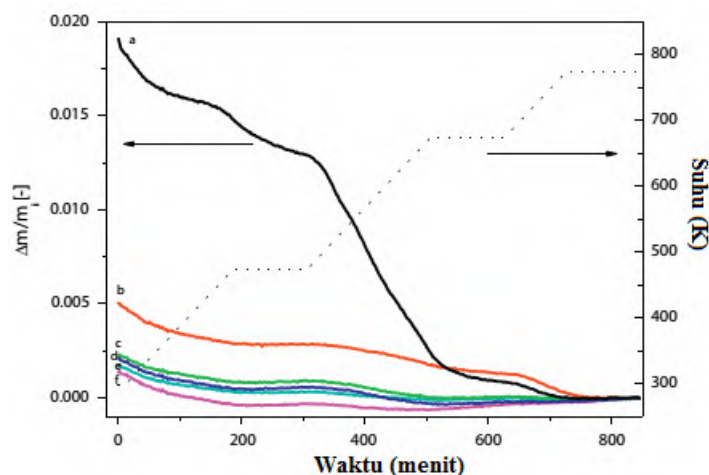
Gambar 2.13 Hasil AFM dari (a). CNF Urea, (b). CNF Mikroemulsi Urea, (c). LCNF urea dan (d). LCNF Mikroemulsi Urea (Carrillo dkk., 2014)

Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa perlakuan awal dengan urea (Gambar 2.13a dan 2.13c) memiliki nano serat yang lebih lebar dibandingkan dengan perlakuan awal melalui mikroemulsi urea (Gambar 2.13b dan 2.13d). Selain itu, serat yang menggumpal pada perlakuan awal dengan urea (lingkar merah) menjadi lebih sedikit setelah perlakuan dengan mikroemulsi urea.

#### 2.9.4 Termal Gravimetry Analysis (TGA)

Teknik analisis termal TGA (*Thermal Gravimetric Analysis*) digunakan untuk menentukan hilangnya massa suatu materi akibat terjadinya dekomposisi. Titik fokus analisisnya pada perubahan berat sampel materi terhadap pemanasan. Data yang didapatkan melalui teknik TGA adalah profil kurva berat terhadap waktu dan profil kurva berat terhadap suhu. Data TGA yang didiferensialkan merupakan DTG (*Differential Thermal Gravimetric*) (Prasetyoko dkk., 2016).

Aguado dkk., (2011) melakukan analisis TGA pada material serat alumina sebagai material pendukung dalam sintesis zeolit. Serat alumina tersebut dimodifikasi menggunakan poli-dialildimetilamoniumklorida (PDDA) dan glukosa dengan konsentrasi tertentu. Gambar 2.14 menunjukkan kurva TGA pada material serat alumina..



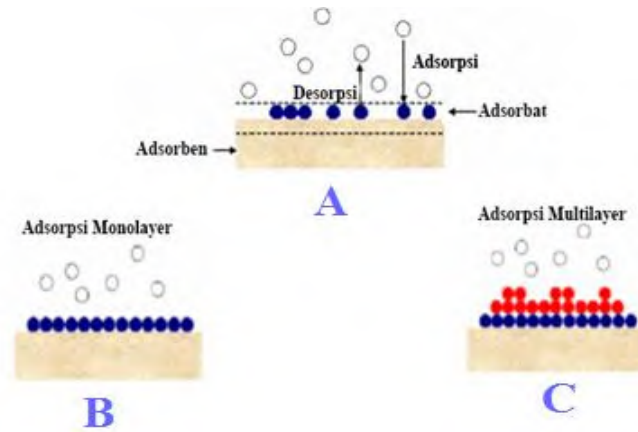
Gambar 2.14 Kurva TGA alumina dengan dengan modikasi : (a). 1 g/mL PDDA; (b). 1 g/mL PDDA dengan kalsinasi; (c). 0,1 g/mL glukosa; (d). 0,001 g/mL PDDA (e). 0,001 g/mL PDDA dengan kalsinasi (f). alumina tanpa modifikasi (Aguado dkk., 2011).

Pada termogram tersebut dapat diamati bahwa diferensial kehilangan massa 1 g/mL PDDA > 1 g/mL PDDA dengan kalsinasi > 0,1 g/mL glukosa > 0,001 g/mL PDDA > 0,001 g/mL PDDA dengan kalsinasi > alumina tanpa modifikasi. Alumina dengan modifikasi 1 g/mL PDDA memiliki diferensial kehilangan massa paling besar (Gambar 2.14a). Pada tahap pertama, terjadi pada suhu 473K dikarenakan hilangnya air, sedangkan pada tahap kedua di suhu 673K, massa yang hilang pada menunjukkan terjadinya dekomposisi dan oksidasi polimer kationik poli-dialildimetilamoniumklorida (PDDA) serta residunya.

### 2.9.5 Adsorpsi Gas Nitrogen

Metode penentuan luas permukaan suatu material padatan dapat dilakukan dengan metode adsorpsi gas nitrogen yang menggunakan teori isotherm Brunauer Emmet Teller (BET). Metode ini merupakan pengembangan dari teori Langmuir

yang didasarkan pada pembentukan lapisan monolayer. Pada Gambar 2.15 menunjukkan proses dimana luas permukaan material yang dianalisa diukur dari jumlah molekul yang teradsorp pada lapisan monolayer, sedangkan ukuran pori ditentukan oleh tekanan kondensasi gas dalam pori-pori padatan (Devianti, 2014).



Gambar 2.15 Proses adsorpsi gas : (A). Gas mulai teradsop pada monolayer, (B). Adsorpsi gas pada monolayer mencapai titik jenuh dan (C). Gas mulai teradsorp pada multilayer (Devianti 2014)

Setelah terbentuk lapisan adsorbat pada daerah monolayer, maka akan terbentuk lapisan kedua sebagai lapisan multilayer. Banyaknya adsorbat yang terserap dinyatakan dengan  $p/p_0$ , sehingga akan diperoleh persamaan regresi pada keadaan setimbang antara laju adsorpsi dan desorpsi seperti pada Persamaan (2.24).

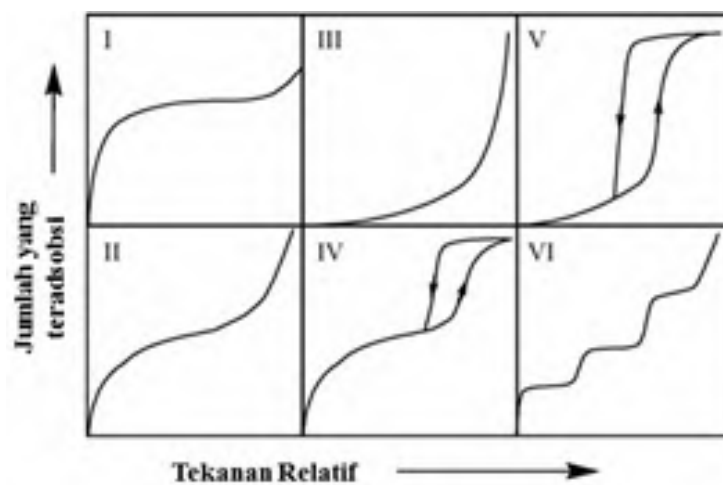
$$\frac{1}{W\left(\left(\frac{p_0}{p}\right) - 1\right)} = \frac{1}{W_m \cdot C} + \frac{C - 1}{W_m \cdot C} \times \frac{p}{p_0} \quad (2.24)$$

dimana  $W$  adalah berat gas  $N_2$  yang digunakan selama proses adsorpsi (gram);  $W_m$  adalah berat adsorbat yang digunakan hingga mencapai kesetimbangan lapisan monolayer (gram);  $p$  adalah tekanan uap dari adsorbat (atm); dan  $p_0$  adalah tekanan uap murni dari adsorbat (atm) (Broom, 2011).

Jika persamaan diatas diasumsikan sebagai persamaan regresi linier  $y=ax+b$ , maka akan dapat ditentukan nilai  $W_m$  dan luas permukaan spesifik dapat dihitung berdasarkan Persamaan (2.25).

$$S = \frac{W_m \cdot N_A \cdot A}{M_r \cdot m} \quad (2.25)$$

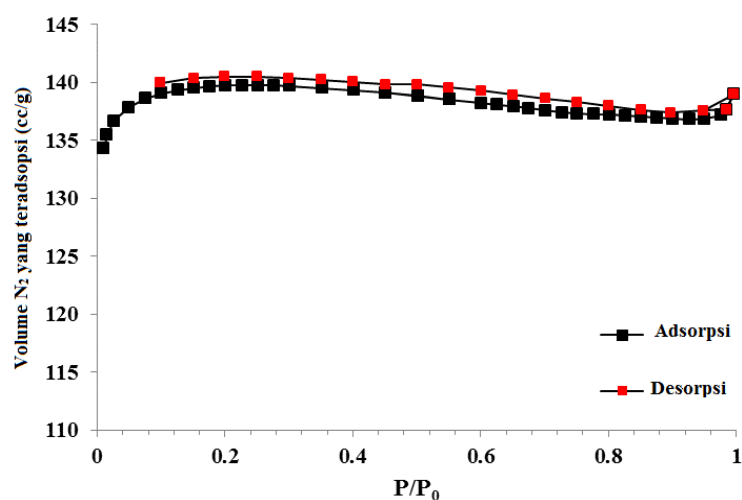
dimana  $N_A$  adalah bilangan Avogadro ( $6,02 \times 10^{23}$  partikel/mol);  $A$  adalah luas sebaran  $N_2$  ( $16,2 \text{ \AA}$ );  $M_r$  adalah massa molekul relatif (gram/mol); dan  $m$  adalah massa adsorben/katalis (gram). Data hasil analisis adsorpsi gas berupa suatu grafik adsorpsi isothermal yang berbeda-beda. Beberapa tipe adsorpsi isothermal ditunjukkan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Tipe grafik adsorpsi isothermal (Song dkk., 2003).

Wardani dkk., (2014), melakukan penelitian tentang adsorpsi-desorpsi zeolit-X berpendukung serat gelas yang diaktivasi dengan NaOH 4M selama 1 hari (ZXS-K4M). Grafik isothermal adsorpsi – desorpsi nitrogen dari ZXS-K4M ditunjukkan dalam Gambar 2.17. Tipe isotherm dari ZXS-K4M merupakan gabungan dari tipe I dan IV. Grafik isotherm tipe I ditandai dengan adanya adsorpsi sejumlah besar  $N_2$  pada tekanan relatif ( $P/P_0 < 0,3$ ) yang sangat rendah. Hal ini menunjukkan bahwa sampel memiliki karakteristik mikropori. Karakteristik loop histeresis pada grafik tersebut mengindikasikan isotherm tipe IV. Loop histeresis tersebut menunjukkan pengisian adsorbat pada pori non-mikropori, yang dapat dihubungkan dengan adanya kondensasi kapiler pada pori berukuran meso yang terbentuk pada permukaan padatan ZXS-K4M. Proses adsorpsi  $N_2$  pada  $P/P_0$  antara 0,1- 0,3 yang sangat tinggi menunjukkan bahwa gas nitrogen telah teradsorpsi

dan membentuk monolayer pada permukaan ZXS-K4M. Setelah itu, saat tekanan relatif ( $P/P_0$ ) dinaikkan hingga 0,7, terjadi sedikit penurunan adsorpsi gas  $N_2$  yang diakibatkan oleh lepasnya gas nitrogen akibat distribusi pori rata-rata berukuran meso. Pada saat tekanan mencapai 1 atm, material ZXS-K4M sudah tidak mampu lagi mengadsorpsi gas  $N_2$ , sehingga tidak terjadi lagi peningkatan kapasitas adsorpsi gas nitrogen.



Gambar 2.17 Kurva isoterm adsorpsi-desorpsi gas nitrogen ZXS-K4M (Wardani dkk., 2014)

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## **BAB III**

### **METODOLOGI**

#### **3.1 Alat dan Bahan**

##### **3.1.1 Alat**

Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain peralatan botol dan gelas polipropilena (PP), seperangkat *hot plate-stirrer*, pengaduk magnetik, reaktor hidrotermal (*stainless steel autoclave*), oven, pH meter, seperangkat alat adsorpsi gas dengan metode gravimetri, *X-Ray Diffraction* (XRD), *Atomic Force Microscopy* (AFM), *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *Termal Gravimetry Analysis* (TGA) dan *Chemisorption Analyzer* (*Quantachrome Autosorb iQwin*).

##### **3.1.2 Bahan**

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah aqua demineral (DM), padatan NaAlO<sub>2</sub> (p.a), larutan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (p.a), pelet NaOH (99% p.a), kertas saring, serat kapas (*Gossypium hirsutum* L.), kapuk (*Ceiba Petandra* B.) dan nanas (*Ananas comosus* L.) sebagai material serat, gas karbondioksida.

#### **3.2 Prosedur Kerja**

##### **3.2.1 Preparasi Serat**

Serat kapas (*Gossypium hirsutum* L.) dan Kapuk (*Ceiba Petandra* B.) dibersihkan dari buah tanaman tersebut dan bijinya, sedangkan serat nanas (*Ananas comosus* L.) dipreparasi dari daun nanas. Daun nanas direndam dalam air selama  $\pm 3$  minggu. Daun nanas yang telah direndam dipisahkan seratnya kemudian dicuci dengan air dan dikeringkan pada suhu 105 °C hingga berat konstan (Hidayat., 2008).

##### **3.2.2 Aktivasi Serat Alam**

Material pendukung serat alam yaitu serat kapas, kapuk dan nanas diaktivasi terlebih dahulu dengan larutan NaOH 4 M (Carrier dkk., 2011 ; Jie dkk., 2008 Mochtar dkk., 2007). Masing-masing serat alam ditimbang sebanyak 1



gram, kemudian direndam dalam larutan NaOH 4M sebanyak 20 mL di wadah polipropilena (PP). Proses aktivasi dilakukan dengan variasi waktu perendaman selama 12, 18, 24, 30 dan 36 jam pada suhu ruang. Selanjutnya, serat alam dicuci dengan air demineralisasi hingga pH 7 dan dikeringkan pada suhu 105 °C, hingga massa mencapai konstan. Serat alam yang telah teraktivasi kemudian diberi nama Kapas 4M-12J (serat kapas aktivasi 12 jam); Kapas 4M-18J (serat kapas aktivasi 18 jam); Kapas 4M-24J (serat kapas aktivasi 24 jam); Kapas 4M-30J (serat kapas aktivasi 30 jam); Kapas 4M-36J (serat kapas aktivasi 36 jam); Kapuk 4M-12J (serat kapuk aktivasi 12 jam); Kapuk 4M-18J (serat kapuk aktivasi 18 jam); Kapuk 4M-24J (serat kapuk aktivasi 24 jam); Kapuk 4M-30J (serat kapuk aktivasi 30 jam); Kapuk 4M-36J (serat kapuk aktivasi 36 jam); Nanas 4M-12J (serat nanas aktivasi 12 jam); Nanas 4M-18J (serat nanas aktivasi 18jam); Nanas 4M-24J (serat nanas aktivasi 24 jam); Nanas 4M-30J (serat nanas aktivasi 30 jam) dan Nanas 4M-36J (serat nanas aktivasi 36 jam) (Aloymary dkk., 2013 ;Carrier dkk., 2009 ; Jie dkk., 2009 ; Lopattananon dkk 2006; Mokhtar dkk., 2007; Riama dkk., 2012 ; Siregar dkk., 2010 ; Zheng dkk., 2012

### **3.2.3 Sintesis Zeolit X pada Permukaan Serat Alam**

Pada penelitian ini dilakukan sintesis zeolit X pada permukaan serat alam dengan dua tahapan. Tahapan pertama adalah pembuatan larutan prekursor dan tahap kedua adalah hidrotermal. Tahap pertama dilakukan pencampuran pelet 10,3511 g NaOH dengan 140,6365 g air demineral. Kemudian larutan NaOH tersebut dibagi menjadi dua bagian larutan pada dua gelas PP yang berbeda. Larutan NaOH satu ditandai sebagai Larutan NaOH A dan Larutan NaOH B untuk bagian kedua. Kemudian pembuatan larutan prekursor dilanjutkan dengan pencampuran 7,0073 g  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dalam Larutan NaOH A sambil diaduk menggunakan pengaduk magnetik selama 10 menit sedangkan Larutan NaOH B ditambahkan 1,53902 g  $\text{NaAlO}_2$  dan diaduk menggunakan pengaduk magnetik selama 10 menit. Setelah dua larutan prekursor siap, kedua larutan tersebut dicampurkan kemudian diaduk menggunakan pengaduk magnetik selama tiga jam. Langkah selanjutnya adalah memasukkan larutan prekursor dan masing-masing serat alam teraktivasi sebanyak 0,024% (0,0383g) (Rella, 2013) dalam

reaktor hidrotermal. Selanjutnya reaktor hidrotermal dipanaskan dalam oven dengan suhu 105 °C selama 24 jam. Langkah selanjutnya, zeolit X berpendukung serat alam disaring dan residunya dicuci dengan air demineral sampai pH-nya sama dengan 7. Setelah itu dikeringkan dalam oven dengan suhu 105 °C selama 24 jam (Puspita., 2015 ;Wardani, 2014).

#### **3.2.4 Karakterisasi Zeolit-X pada Permukaan Serat Alam Teraktivasi**

Teknik karakterisasi yang dilakukan dalam penelitian ini antara lain XRD, AFM, TGA, SEM dan analisis adsorpsi gas N<sub>2</sub>. Karakterisasi XRD digunakan untuk melihat adanya fase kristal pada padatan zeolit-X berpendukung s erat alam dan zeolit-X tanpa pendukung serat. Hasil karakterisasi zeolit-X berpendukung material serat alam (ZXSA) dibandingkan dengan zeolit-X tanpa pendukung serat (ZX) untuk melihat persamaan kristalinitas. Karakterisasi AFM digunakan untuk melihat kerusakan struktur serat alam yang digunakan sebagai material pendukung, sedangkan karakterisasi SEM digunakan untuk mengetahui bentuk morfologi kristal zeolit-X pada permukaan serat. Karakterisasi dengan TGA dilakukan untuk melihat suhu terdegradasi dari zeolit-X berpendukung serat alam. Karakter pori dari zeolit-X berpendukung material serat dapat dianalisis menggunakan metode adsorpsi isothermal N<sub>2</sub>, sehingga dapat dihitung luas permukaannya menggunakan persamaan *Brunauer-Emmet-Teller* (BET).

#### **3.2.5 Penentuan Kapasitas Adsorpsi Gas CO<sub>2</sub>**

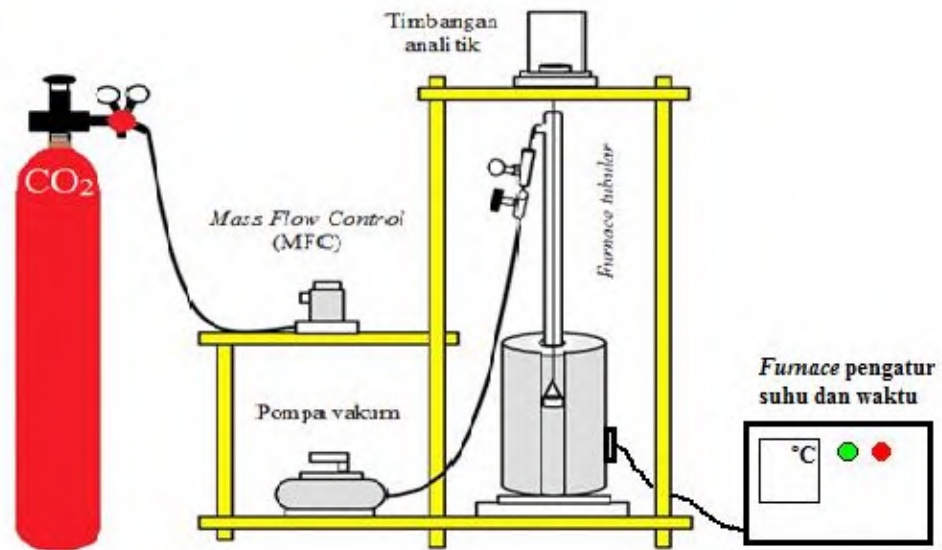
Pengujian kapasitas adsorpsi gas karbondioksida dilakukan pada sampel zeolit-X berpendukung serat alam yang memiliki kristalinitas tertinggi dari masing-masing serat alam yang digunakan. Adsorpsi dilakukan dengan tiga tahap. Tahap pertama adalah proses sterilisasi, tahap kedua adalah proses *degassing* dan tahap ketiga adalah tahap adsorpsi-desorpsi. Tahap sterilisasi dimulai dengan pengeringan sampel. Sampel diambil sebanyak 1 gram dalam cawan lalu dipanaskan dalam oven selama 2 jam pada suhu 105 °C. Setelah itu, sampel didinginkan hingga suhu ruang dan disimpan dalam desikator untuk proses sterilisasi. Sampel yang telah dikeringkan, diambil sebanyak 1 gram dan dimasukkan ke dalam sampel holder yang telah steril. Sampel kemudian di-*degas*

dalam kondisi vakum menggunakan *furnace tubular* pada suhu 250 °C selama 3 jam (Neto dkk., 2015).

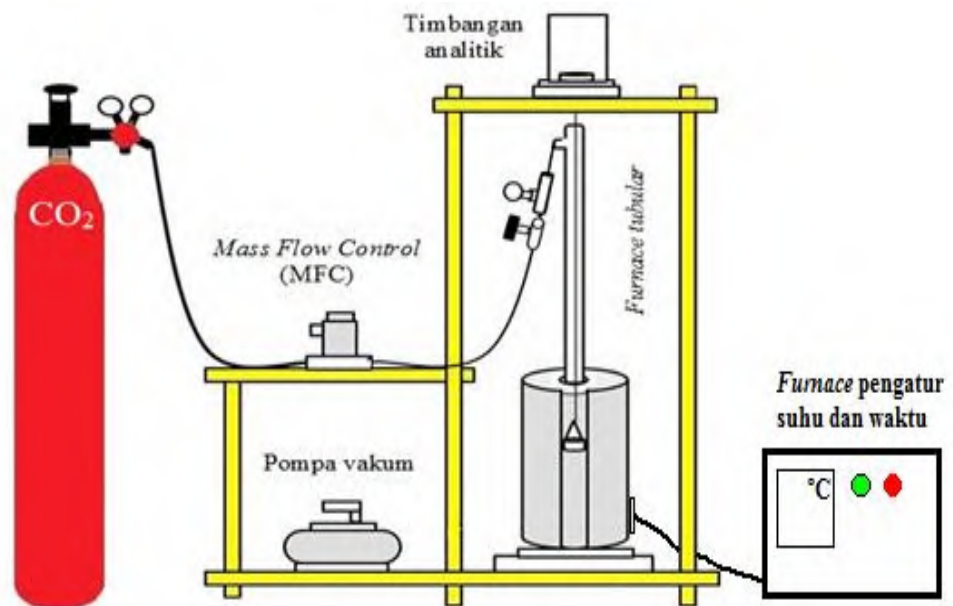
Setelah proses *degassing* selesai, *furnace* dimatikan dan suhu sistem dibiarkan hingga mencapai suhu 30°C (Tyastari, 2015). Berat sampel diamati dan dicatat sebagai berat awal ( $m_0$ ) sampai tercapai berat konstan. Langkah selanjutnya, *mass flow control* (MFC) dinyalakan dan dipanaskan selama satu jam. Setelah satu jam, MFC dibiarkan sampai stabil dan menunjukkan angka nol. Laju aliran gas karbondioksida diatur sebesar 20 mL/menit dengan MFC. Knop tabung gas CO<sub>2</sub> dibuka hingga gas dapat mengalir secara perlahan. Pengamatan dilakukan terhadap perubahan yang terjadi setiap 1 menit hingga diperoleh berat konstan. Berat yang konstan ini dicatat sebagai berat akhir setelah adsorpsi ( $m_t$ ). Setelah diperoleh berat konstan, knop tabung gas CO<sub>2</sub> ditutup, sehingga tidak ada aliran gas CO<sub>2</sub> yang masuk ke dalam reaktor dan tekanan dalam sistem diukur menggunakan *pressure gauge*. Pada penelitian ini variasi suhu yang digunakan yaitu 30 °C, 40 °C dan 50 °C pada tekanan 1 bar (Suci, 2015). Kapasitas adsorpsi karbon dioksida dihitung dengan Persamaan (2.1).

Sementara untuk desorpsi, dilakukan langsung setelah proses adsorpsi mencapai kesetimbangan menggunakan pompa vakum. Massa akhir adsorpsi dicatat sebagai ( $m_0$ ) desorpsi dan pengurangan massanya dicatat tiap 1 menit hingga mencapai massa konstan. Massa konstan ini dicatat sebagai massa kesetimbangan desorpsi. Kapasitas desorpsi karbon dioksida dihitung dengan Persamaan (2.2)

Rangkaian alat untuk kedua tahap ini dapat dilihat pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2. Gambar 3.1 merupakan *set up* alat yang digunakan untuk proses *degassing*. Pada rangkaian ini, sampel dihubungkan dengan kawat ke neraca analitis dan selang pompa vakum dihubungkan pada pipa adsorpsi. Gambar 3.2 merupakan *set up* alat saat proses adsorpsi berlangsung. Selang pompa vakum dilepas dan selang gas karbondioksida dihubungkan dalam pipa adsorpsi.



Gambar.3.1 Skema kerja pengukuran adsorpsi secara gravimetri saat proses *degassing*.



Gambar.3.2 Skema kerja pengukuran adsorpsi secara gravimetri saat proses adsorpsi.

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

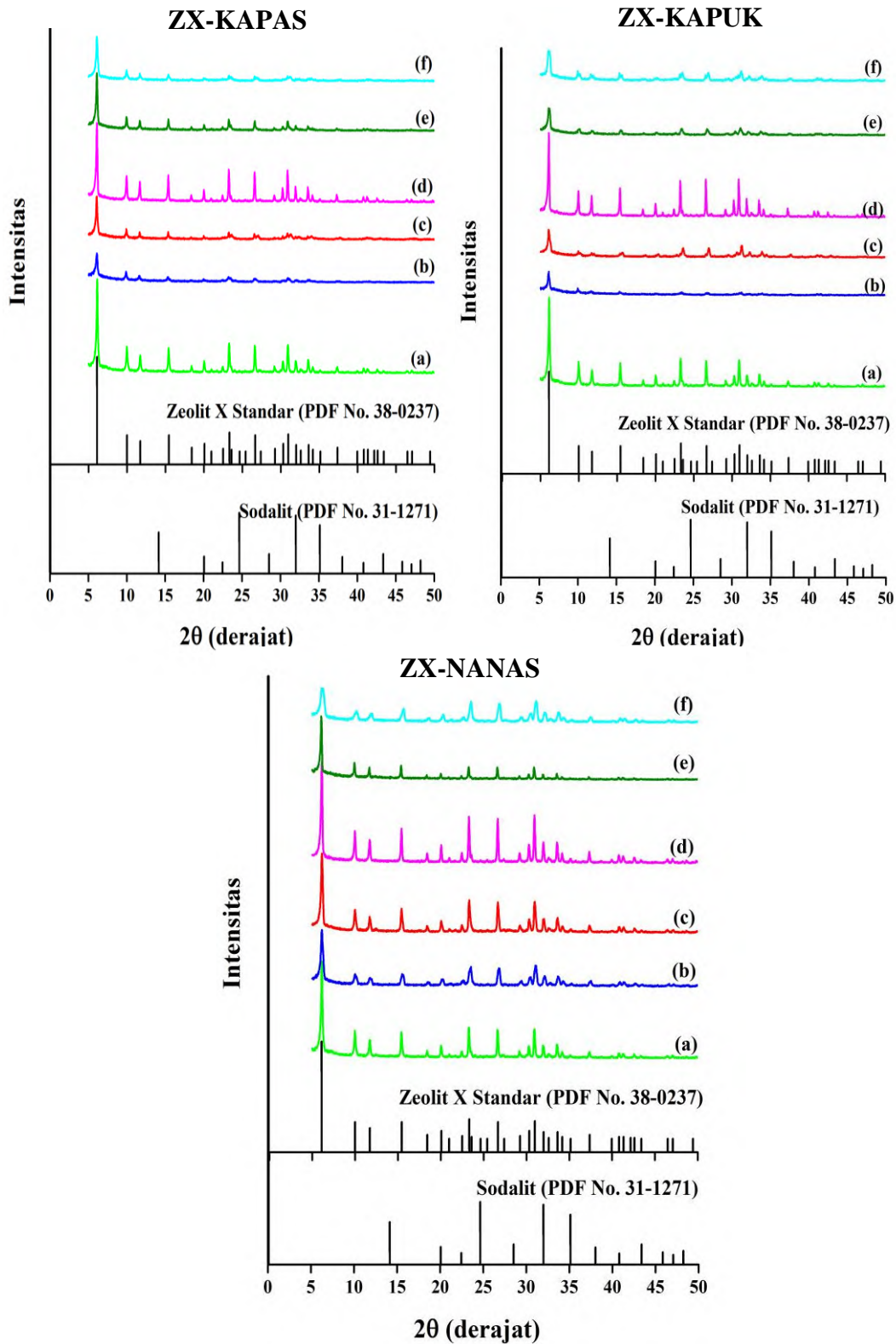
## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada bab ini akan dibahas mengenai waktu optimum untuk aktivasi serat kapas/*Gossypium hirsutum* L., kapuk/*Ceiba petandra* B., dan nanas/*Ananas* sebagai material pendukung zeolit-X yang berpengaruh terhadap kristalinitas zeolit X yang terbentuk. Selain itu, akan dibahas karakteristik dan kapasitas adsorpsi-desorpsi CO<sub>2</sub> dari adsorben zeolit-X berpendukung serat alam yang telah diaktivasi dengan kondisi optimum, sehingga diperoleh jenis serat yang lebih efektif sebagai material pendukung zeolit-X. Selain itu, juga dikaji model kinetika dan beberapa sifat termodinamika adsorpsi CO<sub>2</sub> pada zeolit-X berpendukung serat dengan kapasitas tertinggi.

#### **4.1 Pengaruh Waktu Aktivasi Serat Terhadap Kristalinitas Zeolit-X Berpendukung Serat Alam.**

Pengaruh waktu aktivasi serat terhadap kristalinitas zeolit-X yang terbentuk pada permukaan serat kapas/*Gossypium hirsutum* L., kapuk/*Ceiba petandra* B., dan nanas/*Ananas* dapat ditunjukkan pada Gambar 4.1. Pada gambar difraktogram tersebut menunjukkan bahwa semua variasi waktu aktivasi pada ketiga jenis serat menunjukkan pola difraksi yang khas untuk zeolit-X pada  $2\theta = 6,1^\circ ; 9,9^\circ ; 11,7^\circ ; 15,5^\circ ; 23,3^\circ ; 26,6^\circ$  dan  $30,9^\circ$  (PDF no. 38-0237). Hasil ini menunjukkan bahwa aktivasi serat menyebabkan zeolit-X sebagai material dapat berinteraksi pada permukaan serat. Ketiga jenis serat menunjukkan pola peningkatan kristalinitas yang sama. Hasil kristalinitas relatif dapat dilihat pada Tabel 4.1. Pada tabel tersebut dapat diamati bahwa aktivasi serat pada 12-24 jam menyebabkan peningkatan kristalinitas relatif zeolit-X pada permukaan serat. Akan tetapi, kristalinitas zeolit-X menurun ketika aktivasi serat dilakukan pada 30-36 jam.

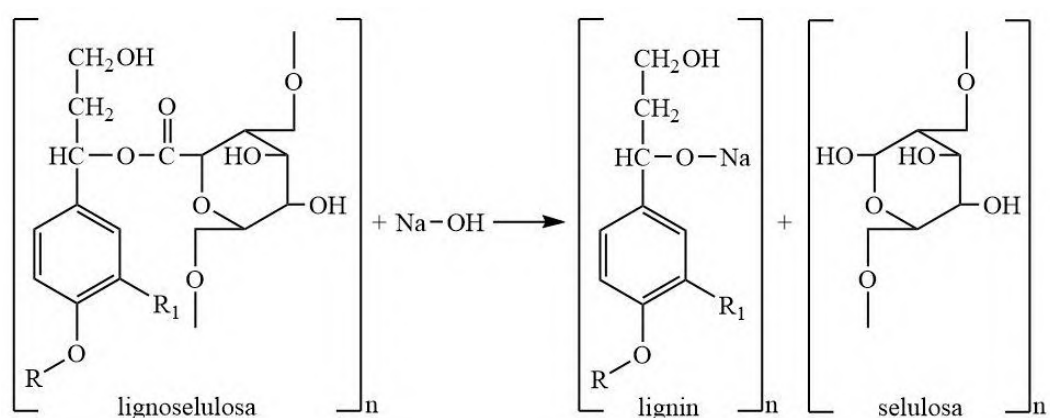


Gambar 4.1. Difraktogram zeolit-X berpendukung serat alam, (a). zeolit-X tanpa serat, (b) aktivasi serat 12 jam, (c). aktivasi serat 18 jam, (d). aktivasi serat 24 jam, (e). aktivasi serat 30 jam dan (f). aktivasi serat 36 jam.

Tabel 4.1 Kristalinitas relatif zeolit-X berpendukung serat alam dengan variasi waktu aktivasi serat.

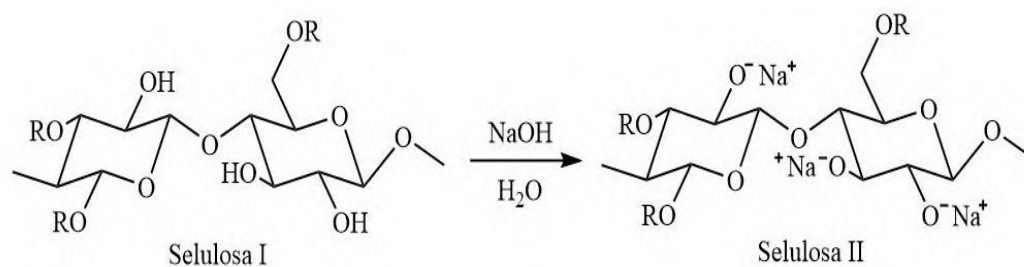
Sampel	Kristalinitas Relatif (%)				
	12 Jam	18 Jam	24 Jam	30 Jam	36 Jam
ZX-Kapas	11,5	18,0	55,5	26,3	16,6
ZX-Kapuk	7,4	15,6	65,0	12,2	12,3
ZX-Nanas	27,0	49,0	71,0	30,0	25,0

Aktivasi serat menyebabkan adanya perubahan komposisi senyawa serat alam. Lignin, hemiselulosa dan zat-zat pengotor yang masih menempel pada serat akan terdegradasi oleh NaOH pada saat aktivasi. Reaksi degradasi lignin oleh NaOH dapat dilihat pada Gambar 4.2. Zat-zat tersebut merupakan zat-zat yang dapat menutup situs aktif serat, sehingga menghambat interaksi antara zeolit dengan selulosa (Jayanudin dkk., 2010 ; Putera, 2012; Vu dkk., 2002 ;Witono dkk., 2013 dan Zheng dkk., 2015 ). Selain itu, aktivasi serat dengan NaOH menyebabkan perubahan selulosa tipe I menjadi selulosa tipe II yang lebih reaktif. Reaksi ini dapat dilihat pada Gambar 4.3. Menurut Vu dkk., (2002) menjelaskan bahwa NaOH dapat berinteraksi dengan gugus-gugus hidroksil dari rantai polimer selulosa pada saat aktivasi, sehingga gugus-gugus hidroksil dari oligomer silika dapat berinteraksi dengan mudah pada selulosa.



Gambar 4.2. Reaksi delignifikasi lignin dari selulosa oleh NaOH (Permatasari dkk., 2013)



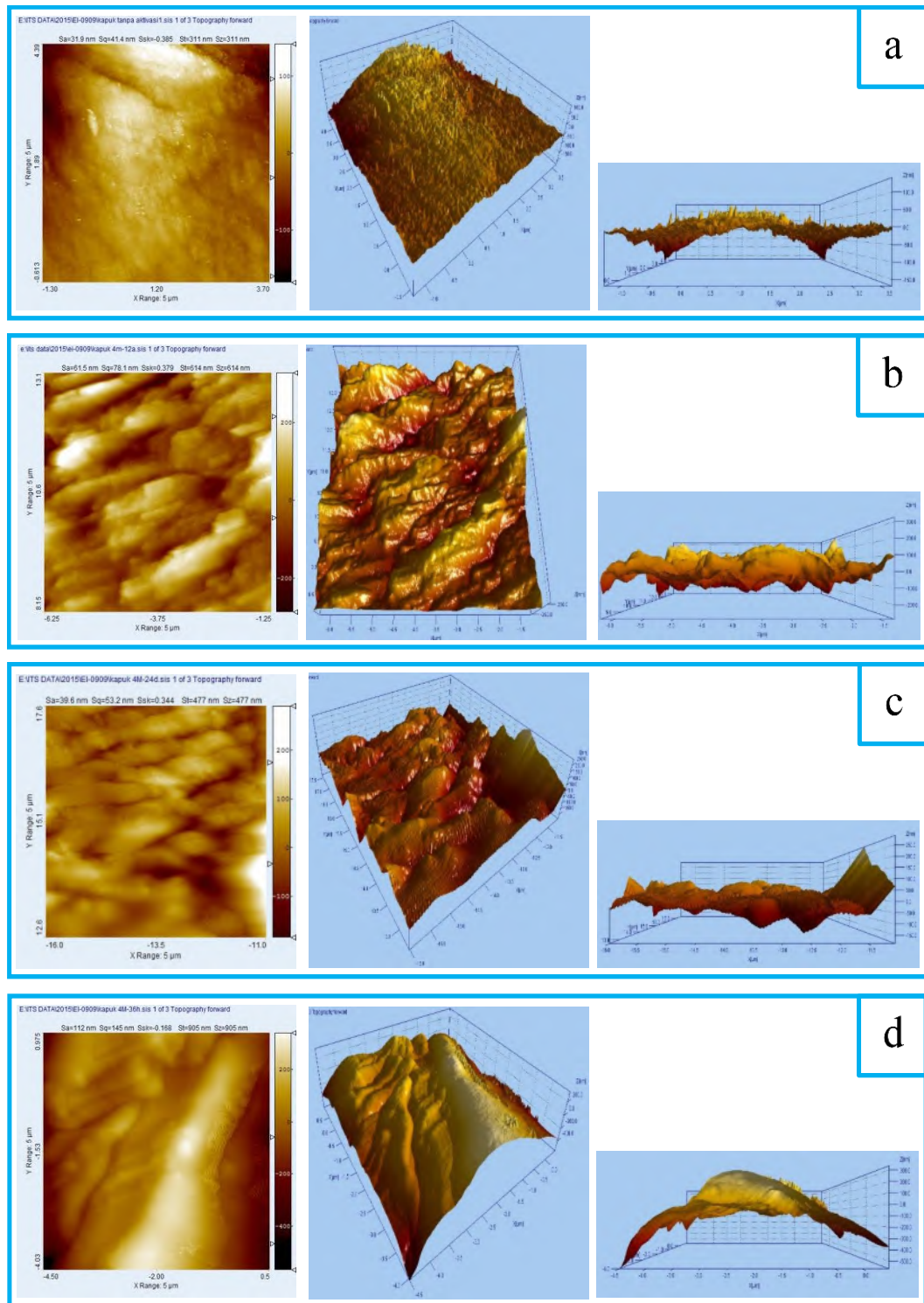


Gambar 4.3. Reaksi perubahan selulosa I ke selulosa II oleh NaOH (Kaushik dkk., 2012)

Kristalinitas zeolit-X yang terbentuk meningkat hingga waktu aktivasi 24 jam. Peningkatan ini terjadi karena semakin lama perendaman dengan NaOH, semakin banyak pula zat lignin dan hemiselulosa yang terdegradasi oleh NaOH. Akan tetapi, kristalinitas cenderung menurun setelah waktu aktivasi 24 jam. Hal ini disebabkan oleh semakin lama perendaman terjadi kelebihan reaksi delignifikasi, sehingga selulosa tipe II yang terbentuk akan terdegradasi oleh NaOH dan menyebabkan penurunan kristalinitas serat tersebut (Biljana dkk., 2008 ; Khausik 2012 dan Siroky dkk., 2011).

Beberapa penelitian yang telah dilakukan menunjukkan kecenderungan yang sama seperti hasil yang diperoleh dalam penelitian ini. Penelitian yang dilakukan Damopilli dkk., (2013) menunjukkan bahwa semakin lama aktivasi serat nanas dengan NaOH (12-48 jam), semakin tinggi pula kadar iod yang diadsorpsi, karena semakin besar sisi aktif serat nanas. Sementara itu, serat selulosa yang mendukung zeolit-Y dan zeolit-L dengan waktu aktivasi serat 14 dan 24 jam cenderung memiliki kristalinitas yang lebih baik pada waktu aktivasi 24 jam (Vu dkk., 2002)

Hasil analisis dengan AFM menunjukkan adanya perubahan topografi permukaan serat yang dapat dilihat pada Gambar 4.4. Topografi permukaan pada serat kapuk tanpa aktivasi memiliki permukaan yang lebih halus dibandingkan dengan serat yang teraktivasi. Serat dengan aktivasi 12-36 jam memiliki permukaan yang lebih kasar bahkan pada aktivasi 36 jam menunjukkan pembengkakan pada permukaan serat yang mengindikasikan terjadinya kerusakan serat akibat aktivasi dengan NaOH.



Gambar 4.4 Micrograf AFM permukaan serat kapuk aktivasi dengan NaOH (a). Tanpa aktivasi, (b). Aktivasi 12 jam, (c). Aktivasi 24 jam dan (d). Aktivasi 36 jam

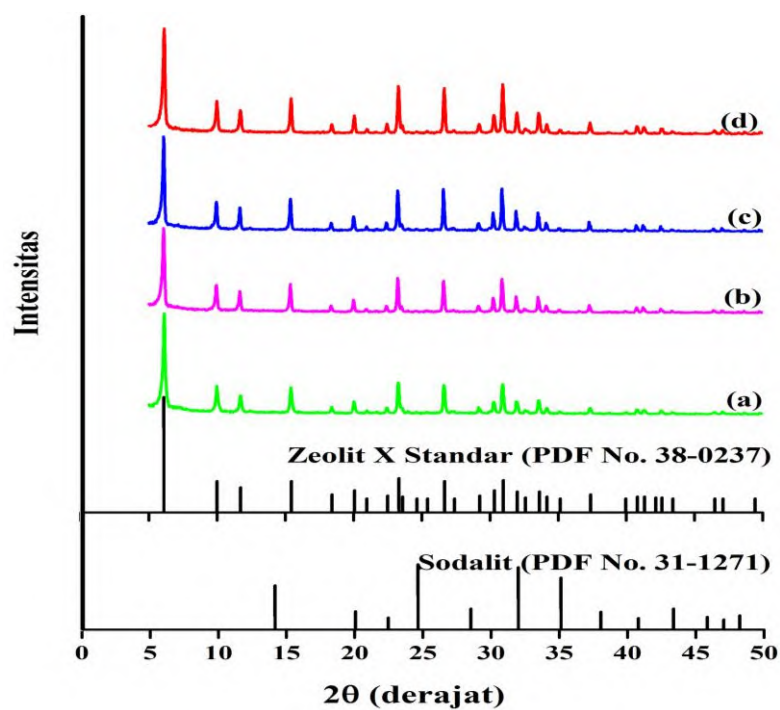
Perubahan topografi pada permukaan serat ini diakibatkan oleh terlarutnya lignin, hemiselulosa dan pengotor lain yang berada dipermukaan serat. Serat tanpa

aktivasi memiliki permukaan yang lebih halus karena lignin, hemiselulosa dan pengotor berbentuk amorf yang masih terdapat dipermukaan serat. Pada aktivasi 12-36 jam, zat-zat tersebut telah larut oleh NaOH yang menyebabkan permukaan serat lebih kasar. Terdegradasinya zat-zat tersebut dapat diamati dengan adanya lembah pada permukaan serat. Sementara itu, aktivasi selama 36 jam menyebabkan serat mengalami pembengkakan sehingga permukaan serat menjadi rusak. Aktivasi serat yang semakin lama akan menyebabkan interaksi serat dengan NaOH semakin lama, sehingga kekuatan ikat kristal dikuasai oleh hidrasi ion natrium ( $\text{Na}^+$ ). Hal ini menyebabkan perubahan kisi kristal dan terjadi pembengkakan yang ireversibel pada serat. Saat terjadi pembengkakan tersebut, terjadi penurunan ikatan hidrogen dalam selulosa yang menyebabkan penurunan kristalinitas serat (Ahad dkk., 2009; Benyahia dkk., 2013 dan Jiao dkk., 2014).

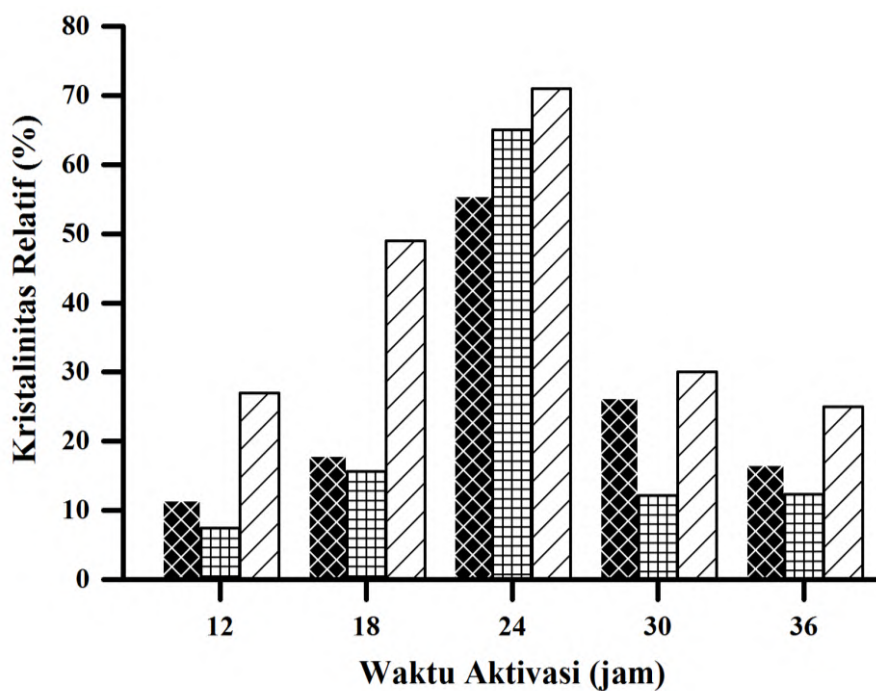
Hal yang sama ditunjukkan dalam penelitian yang dilakukan Liu dkk., (2011). Pada penelitian tersebut menunjukkan bahwa permukaan kapas dan kapuk tanpa aktivasi dengan NaOH memiliki morfologi permukaan yang lebih halus dibandingkan dengan yang telah teraktivasi NaOH. Serat kapuk dan kapas yang dihasilkan memiliki sifat mekanik yang lebih baik daripada serat tanpa aktivasi.

#### **4.2 Pengaruh Jenis Serat Terhadap Kristalinitas Zeolit-X Berpendukung Serat Alam.**

Pengaruh jenis serat terhadap kristalinitas zeolit-X dapat dilihat pada Gambar 4.5. Pola difraksi yang dihasilkan dari ketiga jenis material tersebut menunjukkan pola difraksi yang khas untuk zeolit-X pada  $2\theta = 6,1^\circ$  ;  $9,9^\circ$  ;  $11,7^\circ$  ;  $15,5^\circ$  ;  $23,3^\circ$  ;  $26,6^\circ$  dan  $30,9^\circ$  (PDF no. 38-0237). Hasil ini menunjukkan bahwa ketiga jenis serat mampu menjadi material pendukung zeolit-X. Ketiga jenis serat tersebut memiliki waktu aktivasi optimum yang sama. Tetapi pada hasil difraktogram menunjukkan kristalinitas relatif yang berbeda-beda. Pada Gambar 4.6. menunjukkan bahwa zeolit-X berpendukung serat nanas memiliki kristalinitas tertinggi, kemudian diikuti serat kapuk dan kapas.



Gambar 4.5. Pola difraksi zeolit-X pengaruh serat pendukung: (a). Zeolit-X tanpa serat, (b). Serat kapas, (c). Serat kapuk dan (d). Serat nanas



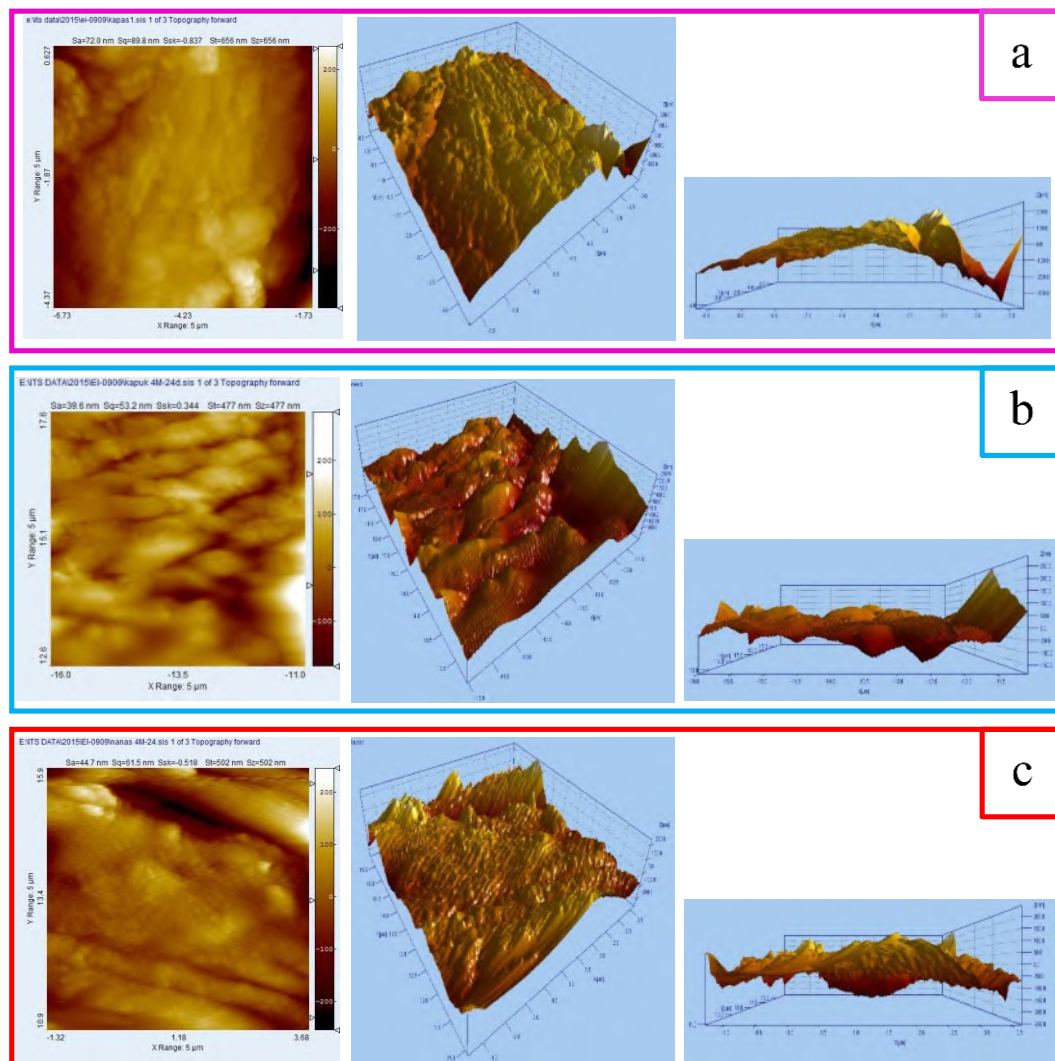
Gambar 4.6. Kristalinitas relatif zeolit-X berpendukung serat alam dengan variasi serat dan waktu aktivasi.

[diagonal lines] Kapas, [grid] Kapuk, [hatched] Nanas

Perbedaan kristalinitas ini tidak hanya dipengaruhi oleh kadar selulosa yang terdapat pada masing-masing serat. Berdasarkan Tabel 2.6, kadar selulosa kapas > nanas > kapuk, tetapi kristalinitas zeolit-X yang diperoleh nanas > kapuk > kapas. Selain kadar selulosa, interaksi antara serat dan zeolit-X juga dipengaruhi oleh jenis selulosa masing-masing serat. Nanas dan kapuk memiliki jenis  $\alpha$  selulosa, sedangkan kapas memiliki jenis  $\beta$  selulosa (Alomayri dkk., 2013). Jenis  $\alpha$  selulosa memiliki derajat polimerisasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan jenis  $\beta$  selulosa. Hal ini menyebabkan  $\alpha$  selulosa tidak mudah terdegradasi pada NaOH 4M, sedangkan  $\beta$  selulosa lebih mudah terdegradasi (Putera, 2012). Terdegradasinya selulosa mengurangi sisi aktif dari permukaan serat. Hal ini menyebabkan kapas memiliki kristalinitas yang lebih rendah daripada kapuk meskipun memiliki kadar selulosa yang lebih tinggi daripada serat kapuk dan nanas. Nanas memiliki kristalinitas tertinggi, karena selain merupakan jenis  $\alpha$  selulosa dengan kadar selulosa yang tinggi, serat yang berasal dari daun memiliki derajat polimerisasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan serat yang berasal dari buah. Oleh karena itu, serat nanas memiliki lebih banyak monomer selulosa yang memungkinkan lebih banyak zeolit yang dapat berikatan dengan serat (Joseph dkk., 1999).

Hasil analisis dengan AFM menunjukkan bahwa permukaan serat alam dengan jenis yang berbeda-beda memiliki topografi yang berbeda-beda pula. Hasil mikrogramnya dapat dilihat pada Gambar 4.7. Pada gambar tersebut dapat diamati bahwa serat kapas memiliki permukaan yang lebih halus dibandingkan dengan serat nanas dan serat kapuk. Sementara itu, serat kapuk memiliki permukaan dengan lembah yang lebih besar dibandingkan dengan kedua jenis serat alam yang lain.

Perbedaan topografi pada Gambar 4.7 disebabkan oleh kadar dan jenis selulosa yang dimiliki serat tersebut. Serat kapas memiliki permukaan yang lebih halus karena memiliki kandungan lignin dan hemiselulosa yang sangat sedikit dibandingkan dengan serat nanas dan kapuk (Tabel 2.6). Hal ini menyebabkan permukaan serat kapas tidak banyak memiliki lembah pada permukaan serat akibat terlarutnya zat-zat nonselulosa tersebut. Sebaliknya, kapuk memiliki lembah yang lebih besar diantara ketiga jenis serat tersebut karena banyaknya zat nonselulosa yang terlarut saat aktivasi (Pothan dkk., 2002).



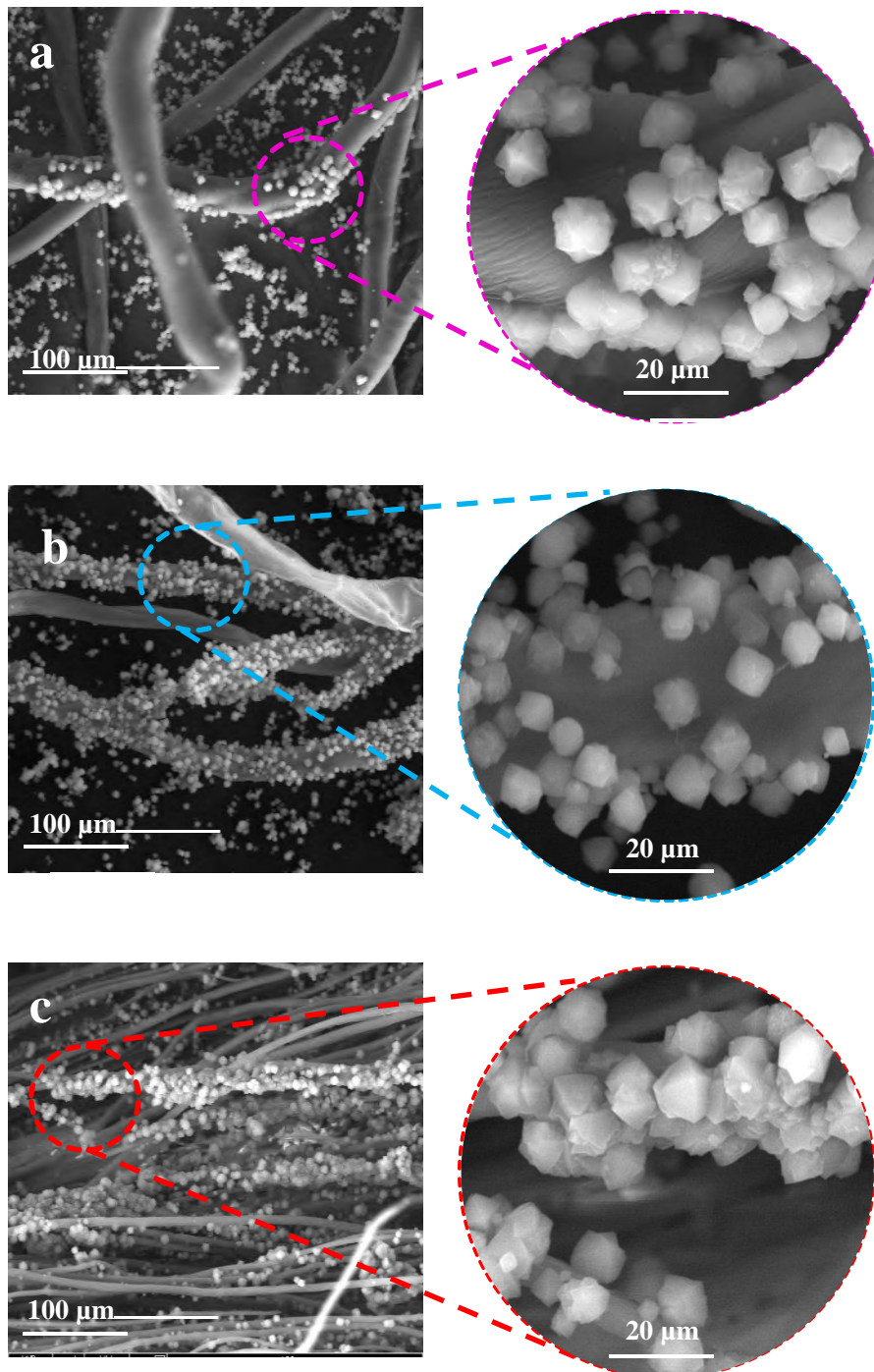
Gambar 4.7. Mikrograf AFM permukaan serat alam yang diaktivasi dengan NaOH  
(a). Serat kapas, (b). Serat kapuk dan (c). Serat nanas

Meskipun kapas memiliki permukaan yang lebih halus tetapi terjadi pembengkakan serat yang tinggi oleh adanya selulosa yang terdegradasi pada kondisi aktivasi tersebut (Jiao dkk., 2014). Permukaan serat yang halus menyebabkan interaksi serat dengan zeolit-X lebih sedikit dibandingkan dengan permukaan yang lebih kasar.

Hasil topografi permukaan serat dapat mempengaruhi tumbuhnya kristal zeolit-X yang dapat diamati pada Gambar 4.8. Hasil analisis dengan SEM menunjukkan bahwa kristal zeolit-X lebih sedikit tumbuh pada permukaan serat kapas dibandingkan pada permukaan serat kapuk dan serat nanas. Sementara itu, serat nanas memiliki kristal zeolit-X yang lebih padat dibandingkan dengan



kedua jenis serat tersebut. Hasil didukung oleh Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 yang menunjukkan kristalinitas zeolit-X tertinggi pada serat nanas.



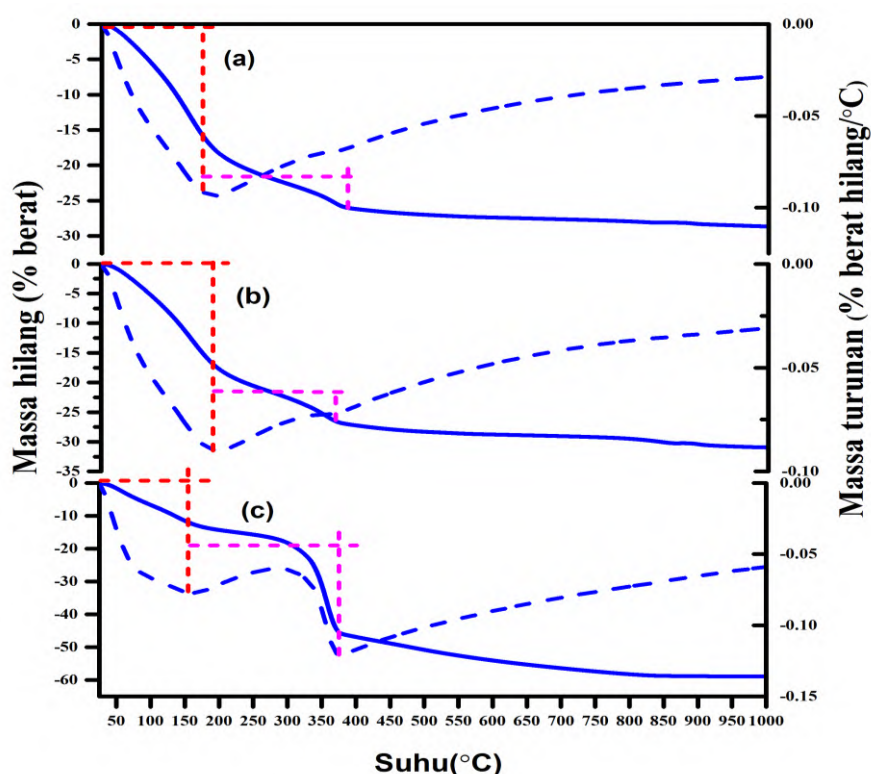
Gambar. 4.8 Micrograf SEM zeolit-X berpendukung serat alam dengan variasi jenis serat: (a) Kapas, (b) Kapuk dan (c). Nanas

Hasil analisis SEM ini dipengaruhi oleh topografi permukaan serat yang telah ditunjukkan sebelumnya. Permukaan kapas yang lebih halus akan menyebabkan kurangnya interaksi antara zeolit dan permukaan serat. Selain itu, terdegradasinya selulosa yang ditunjukkan dengan adanya pembengkakan serat menyebabkan berkurangnya sisi aktif selulosa untuk berinteraksi dengan zeolit-X.

Hasil yang sama ditunjukkan dalam penelitian yang telah dilakukan oleh Liu dkk., (2011). Pada penelitian tersebut menunjukkan bahwa permukaan serat kapas lebih halus dari pada serat kapuk setelah diaktivasi dengan NaOH. Perubahan permukaan serat kapas juga tidak berubah secara signifikan baik sebelum dan setelah diaktivasi karena kandungan selulosa yang lebih tinggi.

#### 4.3 Analisis Termal Zeolit-X Berpendukung Alam

Stabilitas termal dari material zeolit-X berpendukung serat kapas, kapuk dan nanas dapat dilihat pada Gambar 4.9. Pada termogram tersebut menunjukkan



Gambar 4.9 Kurva TGA(—) dan DTG (----) dari (a). ZX-Kapas , (b). ZX-Kapuk dan (c). ZX-Nanas .



bahwa ketiga jenis material memiliki suhu dekomposisi yang cenderung sama. Dekomposisi pertama terjadi pada suhu sekitar 50-150 °C, sedangkan suhu dekomposisi kedua terjadi sekitar 350-400 °C. Banyaknya massa yang terdekomposisi pada kedua tahap dekomposisi tersebut disajikan pada Tabel 4.2. Pada tabel tersebut dapat diamati bahwa pada tahap pertama material zeolit-X berpendukung serat nanas memiliki persen kehilangan massa yang lebih sedikit dibandingkan dengan kedua serat yang lain. Sebaliknya pada tahap yang kedua material zeolit-X berpendukung serat nanas memiliki persen kehilangan massa yang lebih besar dibandingkan dengan kedua serat yang lain. Pada tahap ini pun serat kapas memiliki kehilangan massa yang lebih sedikit daripada serat nanas dan serat kapuk.

Tabel 4.2 Persentase massa yang hilang pada suhu dekomposisi.

Sampel	Kristalinitas Relatif (%)	Massa yang hilang pada suhu dekomposisi (%)	
		50-150 °C	350-400 °C
ZX-Kapas	55,5	22,38	5,66
ZX-Kapuk	65,7	21,48	8,7
ZX-Nanas	71,1	6,84	43,46

Perbedaan pengurangan massa tersebut disebabkan oleh perbedaan kristalinitas relatif zeolit-X pada permukaan serat, topografi dan morfologi masing-masing serat yang ditunjukkan pada sub bab 4.2. Pada tahap I yang merupakan dekomposisi dari air yang teradsorp pada material (Siregar dkk., 2010 dan Georgive dkk., 2013). Pada tahap ini ZX-Kapas memiliki persen kehilangan massa lebih besar yang mengindikasikan bahwa material ini memiliki kelembaban yang tinggi. Sementara itu, pada tahap kedua terjadi dekomposisi selulosa. Selulosa tanpa komposit akan mengalami dekomposisi pada suhu 225-425 °C (Abidi dkk., 2010 dan Rahman dkk., 2011). Pada tahap ini ZX-Nanas memiliki persentase kehilangan massa paling besar yang mengindikasikan bahwa pada material ini memiliki kandungan selulosa yang tinggi setelah diaktivasi dengan NaOH pada kondisi optimum. Zeolit NaX juga memiliki suhu dekomposisi pada suhu 300-500 °C, sehingga dengan pengurangan ini juga disebabkan oleh banyaknya zeolit-X yang tumbuh pada permukaan serat nanas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 9

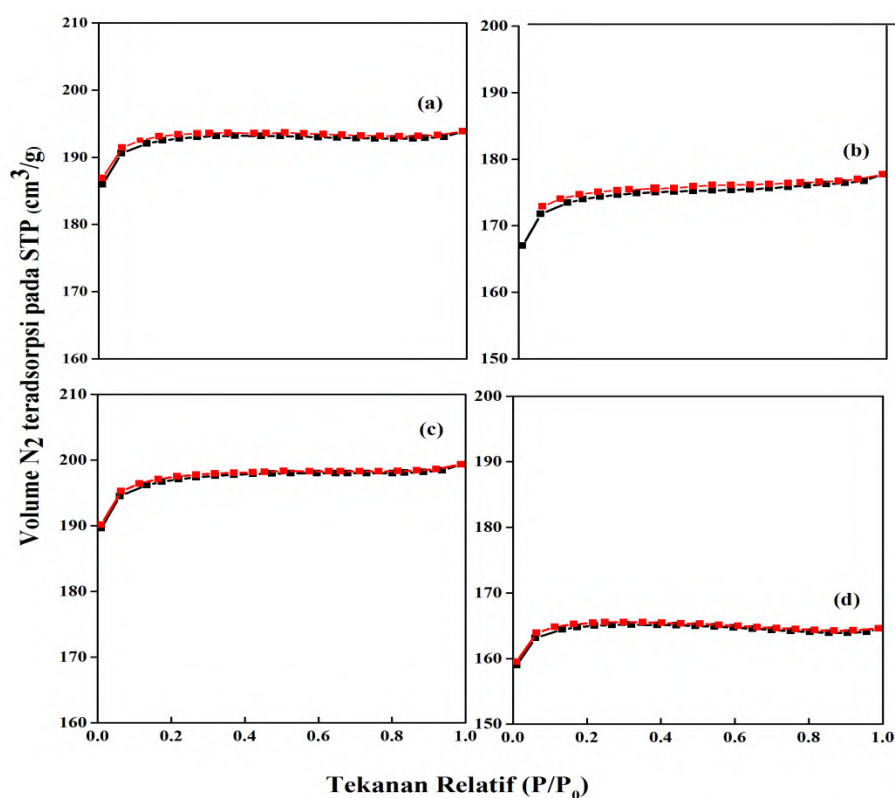
Sementara itu, pada ZX-Kapas memiliki persentasi sangat sedikit karena terdegradasinya selulosa oleh NaOH saat aktivasi dan sedikitnya jumlah zeolit-X yang tumbuh dipermukaan serat kapas.

Beberapa penelitian yang pernah dilakukan menunjukkan bahwa serat alam yang terkomposit material anorganik dan telah diaktivasi memiliki stabilitas termal yang lebih tinggi daripada serat alam tanpa aktivasi. Pada penelitian yang dilakukan oleh Draman dkk., (2014) menunjukkan bahwa kapuk yang diaktivasi dengan NaOH memiliki stabilitas termal lebih tinggi daripada kapuk tanpa aktivasi. Hal ini karena masih terdapatnya lignin dan hemiselulosa yang mulai terdekomposisi pada suhu 245-247 °C. Sementara itu polistiren yang berpendukung serat daun nanas memiliki stabilitas termal yang lebih tinggi sekitar 345 °C daripada serat daun nanas tanpa polistiren dan aktivasi yang mulai terdekomposisi pada suhu 200-300 °C (Siregar dkk., 2010). Hasil ini juga mengindikasikan bahwa pada material ZX-Kapas, ZX-Kapuk dan ZX-Nanas mengalami pengurangan lignin saat aktivasi yang ditunjukkan dengan tidak adanya puncak DTG pada suhu 200-240 °C sebagai puncak khas terdekomposisinya lignin dan hemiselulosa (Kabir dkk., 2011).

#### **4.4 Karakterisasi Pori Zeolit-X Berpendukung Alam**

Hasil karakterisasi pori dari material zeolit-X berpendukung serat alam dapat dilihat kurva isotherm adsorpsi – desorpsi gas nitrogen pada Gambar 4. 10. Grafik adsorpsi-desorpsi tersebut menunjukkan secara kualitatif mekanisme adsorpsi dan struktur pori dari material zeolit-X berpendukung serat alam dan zeolit-X tanpa serat sebagai pembanding. Gambar 4.10 menunjukkan bahwa adsorpsi nitrogen mulai terjadi pada tekanan relatif  $P/P_0 = 0$  dalam jumlah yang banyak. Semua material adsorben menyerap gas  $N_2$  dalam jumlah yang banyak pada  $P/P_0$  yang rendah ( $P/P_0 < 0,2$ ). Penyerapan ini menunjukkan bahwa semua material ini memiliki grafik isotherm tipe I sebagai karakteristik dari mikropori. Selain itu, loop histeresis dari gambar tersebut mengindikasikan grafik tersebut merupakan grafik isotherm tipe IV. Loop histeresis tersebut menunjukkan pengisian adsorbat pada pori berukuran meso yang terdapat pada permukaan zeolit-X berpendukung serat alam.

Proses adsorpsi  $N_2$  pada tekanan rendah antara 0,0 - 0,3 yang sangat tinggi menunjukkan bahwa gas nitrogen telah teradsorpsi dan membentuk monolayer pada permukaan material adsorben. Selanjutnya, terjadi penurunan adsorpsi gas  $N_2$  yang diakibatkan oleh lepasnya gas nitrogen akibat distribusi pori rata-rata yang berukuran meso. Hal ini dapat diamati dimana saat tekanan diturunkan, kurva isoterm menunjukkan jumlah gas yang terdesorpsi tidak sama dengan jumlah gas yang teradsorpsi. Hal ini disebabkan oleh kondensasi kapiler pada mesopori (Wardani dkk., 2014 dan Cherkendorff dkk., 2003).



Gambar 4.10 Kurva Isoterm Adsorpsi – Desorpsi gas nitrogen (a). Zeolit-X tanpa serat, (b). ZX-Kapas, (c). ZX-Kapuk dan (d). ZX-Nanas

Penentuan luas permukaan spesifik dilakukan dengan metode Brunauer-Emmet-Teller (BET), sedangkan ukuran pori dan distribusi ukuran pori diperoleh dengan metode Horvath-Kawazoe (HK). Metode HK merupakan metode yang paling sederhana dan umum digunakan untuk mengevaluasi distribusi ukuran pori material mikropori (Prasetyoko dkk., 2016). Hasil pengukuran luas permukaan spesifik dari masing-masing katalis ditampilkan pada Tabel 4.3. Berdasarkan tabel

tersebut, zeolit-X tanpa pendukung serat memiliki luas permukaan yang lebih tinggi daripada zeolit-X berpendukung serat kapas dan nanas. Hal ini sebanding dengan volume total mikropori yang lebih tinggi pula pada zeolit-X tanpa serat. Sementara itu, zeolit-X berpendukung serat kapuk memiliki luas permukaan tertinggi dibandingkan dengan material yang lain.

Perbedaan luas permukaan dan ukuran pori disebabkan oleh beberapa faktor. Zeolit-X berpendukung serat kapas dan nanas memiliki luas permukaan yang lebih kecil dibandingkan dengan zeolit-X tanpa serat karena adanya kondensasi zeolit-X pada permukaan serat saat sintesis, sehingga volume total mikroporinya menjadi lebih kecil. Pada zeolit-X berpendukung serat nanas memiliki luas permukaan yang lebih kecil karena terjadinya penumpukan zeolit-X dipermukaan serat seperti yang diamati pada Gambar 4.8, sehingga menyebabkan ukuran partikel dan volume total mikropori lebih besar. Semakin besar ukuran partikel, semakin kecil luas permukaan suatu padatan. Berbeda dengan serat nanas dan kapas, zeolit-X berpendukung serat kapuk memiliki luas permukaan yang tertinggi.

Tabel 4.3 Karakterisasi pori material zeolit-X berpendukung serat alam dan material zeolit-X tanpa pendukung serat.

Sampel	Luas Permukaan (m <sup>2</sup> /g)	Volume Total Mikropori (cm <sup>3</sup> /g)	Volume Total Pori (cm <sup>3</sup> /g)	Jari-jari Pori Rata-rata (nm)	Ukuran Partikel (nm)
Zeolit-X	593.0472	0.2907	0.2998	1.024	10.1172
ZX-Kapas	537.4637	0.2603	0.2749	1.0229	11.1635
ZX-Kapuk	607.604	0.2953	0.3083	1.0184	9.8749
ZX-Nanas	508.0413	0.2498	0.2546	1.0224	11.8101

Hal ini karena ZX-Kapuk memiliki volume total pori yang tinggi dan ukuran partikel yang lebih kecil pula. Tingginya luas permukaan ZX-Kapuk disebabkan oleh adanya pori pada permukaan serak kapuk oleh aktivasi NaOH. Tingginya kandungan lignin serat kapuk dibandingkan dengan kedua jenis serat lain, menyebabkan banyaknya pori yang terbentuk karena terlarutnya lignin oleh NaOH. Oleh karena itu, penambahan serat kapuk sebagai material pendukung

menyebabkan peningkatan luas permukaan yang lebih tinggi dibandingkan dengan zeolit-X tanpa serat.

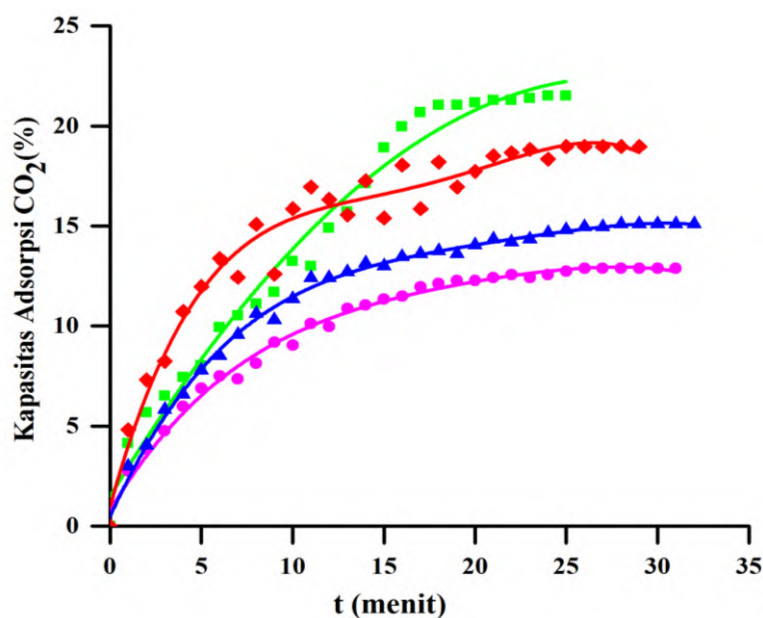
Hasil yang sama juga diperoleh dalam penelitian Wang dkk., (2008). Pada penelitian tersebut, serat kapuk digunakan sebagai material pendukung karbon aktif. Penambahan material kapuk yang teraktivasi menyebabkan peningkatan luas permukaan material dari  $825 \text{ m}^2/\text{g}$  menjadi  $1518 \text{ m}^2/\text{g}$  dengan volume total pori  $0,8728 \text{ cm}^3/\text{g}$ . Selain itu, penambahan selulosa asetat sebagai pendukung zeolit juga meningkatkan luas permukaan selulosa asetat dari  $6,20 \text{ m}^2/\text{g}$  menjadi  $16,08 \text{ m}^2/\text{g}$ . Luas permukaan dari ZX-Nanas, ZX-Kapuk dan ZX-Kapas lebih tinggi dibandingkan dengan material adsorben material zeolit yang lain seperti HZSM-5 ( $301,7 \text{ m}^2/\text{g}$ ), ZSM-5 ( $146,38 \text{ m}^2/\text{g}$ ) dan ZXS-K4M ( $417,541 \text{ m}^2/\text{g}$ ) (Witanto dkk., 2010; Wardani dkk., 2014 dan Widjaya dkk., 2012).

#### **4.5 Pengujian Kapasitas Adsorpsi-Desorpsi $\text{CO}_2$ pada Zeolit-X Berpendukung Serat Alam**

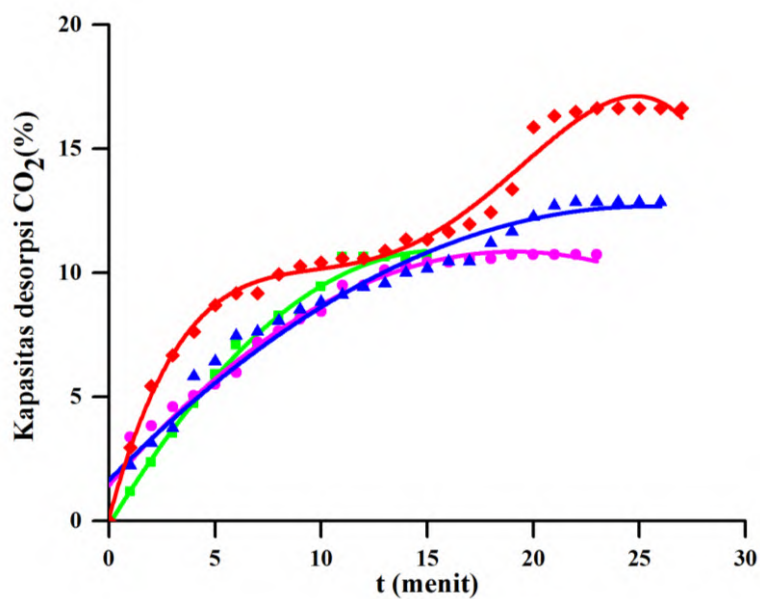
Material adsorben zeolit-X berpendukung serat kapas, kapuk dan nanas yang diaktivasi pada waktu aktivasi optimum serat diaplikasikan pada adsorpsi-desorpsi  $\text{CO}_2$ . Hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4.11 dan Gambar 4.12. Pada grafik tersebut menunjukkan bahwa zeolit-X tanpa serat memiliki kapasitas adsorpsi tertinggi dibandingkan dengan zeolit-X berpendukung serat alam. Zeolit-X memiliki kapasitas adsorpsi yang tinggi, karena memiliki kristalinitas, jumlah kristal dan luas permukaan yang lebih tinggi dibandingkan zeolit-X berpendukung serat kapas dan nanas. Jumlah kristal pada zeolit-X berpendukung serat alam lebih kecil karena pada Gambar 4.8 menunjukkan bahwa zeolit-X belum tumbuh secara merata pada permukaan serat dengan kristalinitas yang tidak seragam.

Sementara itu, zeolit-X berpendukung serat nanas memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi dibandingkan dengan serat kapas dan serat kapuk yang mencapai 18,974%. Hasil ini disebabkan oleh kristalinitas dan rasio volume mikropori yang terdapat pada ZX-Nanas. Semakin tinggi kristalinitas dan rasio volume mikropori, maka semakin selektif material tersebut untuk mengadsorpsi gas

CO<sub>2</sub>. Hubungan antara kapasitas adsorpsi-desorpsi terhadap kristalinitas dan rasio mikropori material zeolit-X berpendukung serat alam dapat dilihat pada Tabel. 4.4



Gambar. 4.11 Grafik adsorpsi CO<sub>2</sub> pada material zeolit-X berpendukung serat alam (tekanan 1 bar): (■) Zeolit-X, (●) ZX-Kapas, (▲) ZX-Kapuk dan (◆) ZX-Nanas



Gambar 4.12 Grafik desorpsi CO<sub>2</sub> pada material zeolit-X berpendukung serat alam (tekanan 1 bar) : (■) Zeolit-X, (●) ZX-Kapas, (▲) ZX-Kapuk dan (◆) ZX-Nanas.

Tabel 4.4 Hubungan antara kapasitas adsorpsi-desorpsi terhadap kristalinitas dan rasio mikropori.

Sampel	Kristalinitas (%)	Rasio Volume mikropori/ Volume Total	Kapasitas adsorpsi CO <sub>2</sub> (%)	Kapasitas Desorpsi CO <sub>2</sub> (%)
Zeolit-X	100	0,9696	21,51	10,64
ZX-Kapas	55,5	0,9469	12,88	10,74
ZX-Kapuk	65,7	0,9578	15,09	12,85
ZX-Nanas	71,1	0,9811	18,97	16,64

Pada tabel tersebut juga menunjukkan bahwa, meskipun kapuk memiliki luas permukaan yang tinggi, tetapi memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih rendah daripada ZX-Nanas, karena memiliki kristalinitas dan ratio mikropori yang lebih rendah. Hal yang sama juga terjadi pada zeolit-X berpendukung serat kapas.

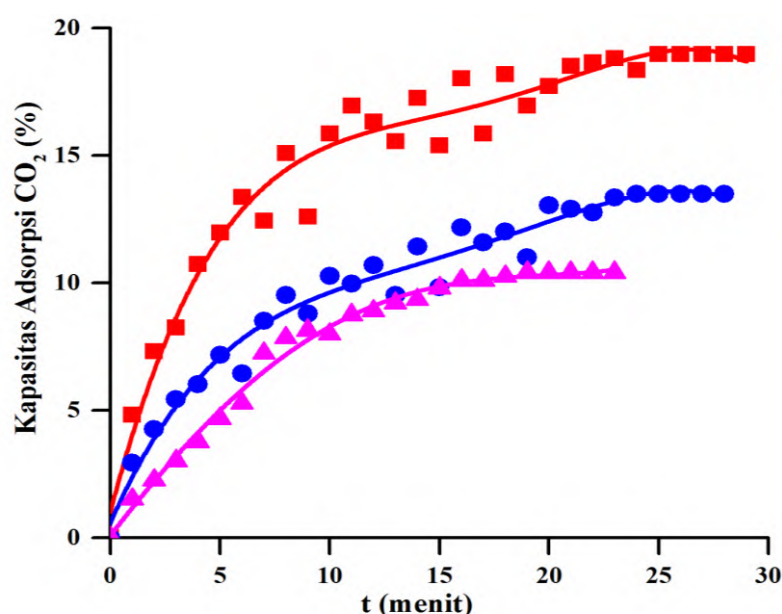
Pada Gambar 4.12 dan Tabel 4.3 menunjukkan bahwa zeolit-X tanpa serat memiliki kapasitas desorpsi yang lebih rendah daripada zeolit-X berpendukung serat kapas, kapuk dan nanas. Hal ini disebabkan oleh ukuran partikel zeolit-X yang kecil dan tanpa material pendukung yang dapat menahan partikel zeolit-X pada saat adsorpsi. Sebaliknya, zeolit-X berpendukung serat alam memiliki kapasitas desorpsi yang tinggi karena pada saat desorpsi serat mampu menopang zeolit-X dan gas yang teradsorpsi dapat di desorpsi kembali dalam waktu yang relatif lebih lama daripada zeolit-X. Selain itu, zeolit-X berpendukung serat nanas memiliki kapasitas desorpsi yang lebih tinggi dibandingkan dengan kapas dan kapuk. Hal ini disebabkan oleh jenis serat nanas berupa  $\alpha$  selulosa yang memiliki derajat polimerisasi yang tinggi, sehingga kekuatan mekanik serat lebih tinggi untuk menopang zeolit-X dalam waktu yang lama. Proses desorpsi zeolit-X berpendukung serat nanas membutuhkan waktu yang lebih lama karena memiliki mikropori yang lebih tinggi dibandingkan dengan material yang lain. Pada proses desorpsi masih terdapat gas CO<sub>2</sub> yang masih tersisa di dalam material diakibatkan oleh interaksi yang masih terjadi di antara kation Na<sup>+</sup> dan momen kuadropol dari CO<sub>2</sub> pada lapisan *monolayer* dan dibutuhkan suhu desorpsi yang tinggi untuk mengadsorpsi seluruh gas CO<sub>2</sub> (Hauchhum dkk., 2014 dan Silva dkk., 2012).

Hasil kapasitas adsorpsi material ini dapat dibandingkan dengan adsorben lain. Jika dikonversi dalam mmol/g, kapasitas material ZX-Kapas, ZX-Kapuk dan ZX-Nanas secara berurutan memiliki kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> sebesar 2,92 mmol/g,

3,413 mmol/g dan 4,31 mmol/g. Hasil ini lebih tinggi dibandingkan dengan material MIL-101 (chromium MOF) sebesar 1,5 mmol/g dan ZX-K4M 2,83 mmol/g (Thirovenkatachari dkk., 2013 dan Wardani dkk., 2014).

#### 4.6 Model Kinetika dan Termodinamika Adsorpsi

Penentuan model kinetika dilakukan pada material zeolit-X berpendukung serat alam yang memiliki kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> tertinggi yaitu ZX-Nanas. Hasil kapasitas adsorpsi ZX-Nanas tiap penambahan suhu 10 °C dapat dilihat pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13. Kapasitas adsorpsi ZX-Nanas pada variasi suhu: ( ■ ) 30 °C, ( ● ) 40 °C, ( ▲ ) 50 °C.

Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa adsorpsi yang dilakukan pada suhu 30 °C memiliki kapasitas adsorpsi yang paling tinggi di antara variasi suhu 40 °C dan 50 °C. Hasil ini mengindikasikan proses adsorpsi cenderung merupakan adsorpsi fisik yang disebabkan oleh gaya *Van der Waal* dengan naiknya suhu, pergerakan molekul CO<sub>2</sub> menjadi lebih cepat, sehingga gaya *Van der Waals* yang menyebabkan interaksi antara CO<sub>2</sub> dan permukaan ZX-Nanas menjadi lemah (Lee dkk., 2002 dan Gunawan, 2015). Selain itu, molekul poliatomik CO<sub>2</sub> yang linier memiliki mode translasi dan mode rotasi yang berpengaruh terhadap energi dalam.

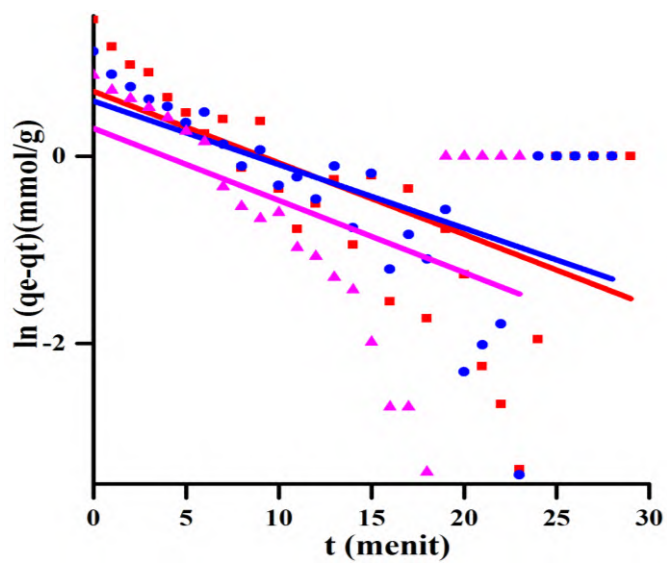


Ketika suhu sistem dinaikkan, maka semua mode gerakan dalam molekul akan bergerak lebih cepat lagi dan menyebabkan energi dalam meningkat (Atkins dkk., 2010).

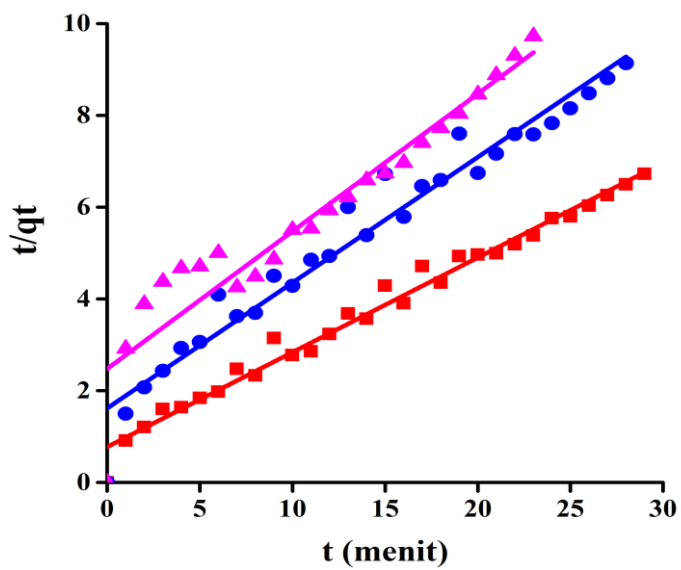
Proses adsorpsi ini dipengaruhi oleh model kinetika dan termodinamika. Data hasil adsorpsi ZX-Nanas diatas dianalisis menggunakan tiga model kinetika orde satu semu dan orde dua semu dan konfirmasi mekanisme adsorpsi oleh model difusi intra partikel (Rashidi dkk., 2013 dan Widiastuti dkk., 2011). Hasil perhitungan ketiga model kinetika adsorpsi ditunjukkan pada Gambar 4.14, 4.15 dan 4.16.

Nilai parameter adsorpsi kinetika dari ketiga model kinetika dapat dilihat dalam Tabel 4.5. Dari data yang diperoleh, nilai koefisien korelasi ( $R^2$ ) pada difusi intra partikel lebih tinggi dari model kinetika yang lain. Model difusi intra partikel mengindikasikan bahwa proses adsorpsi CO<sub>2</sub> ke dalam pori ZX-Nanas berlangsung dalam dua tahap, yaitu tahap difusi mesopori atau permukaan luar adsorben dan tahap difusi kedalam mikropori (Gunawan, 2015). Nilai C sebagai ketebalan lapisan mikropori yang terdifusi adsorbat semakin kecil dengan meningkatnya suhu. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu semakin melemahnya interaksi CO<sub>2</sub> dan adsorben, sehingga semakin sedikit molekul CO<sub>2</sub> yang terdifusi kedalam adsorben. Dari data tersebut juga dapat dilihat bahwa laju penyerapan pada mesopori atau permukaan adsorben lebih tinggi daripada laju difusi mikropori dan semakin kecil dengan meningkatnya suhu (Widiastuti dkk., 2011).

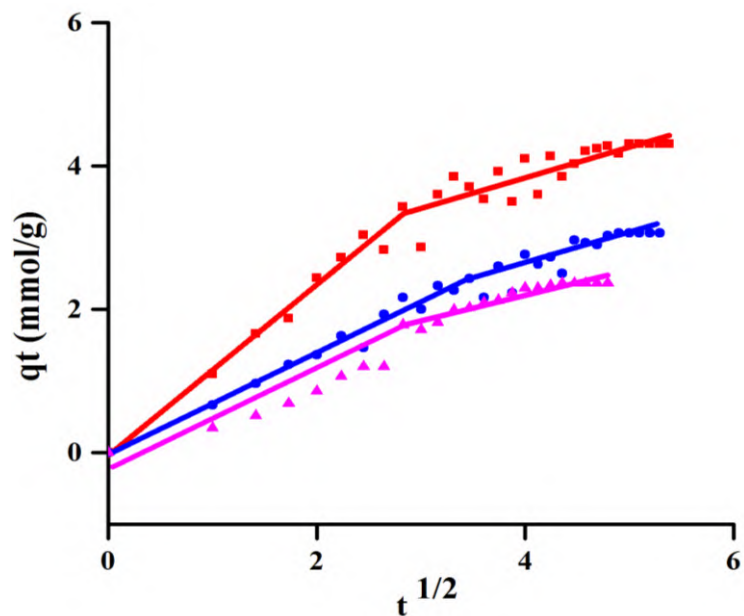
Penelitian yang dilakukan oleh Hafeez dkk., (2015) menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> oleh membran zeolit-selulosa asetat meningkat dengan kenaikan suhu 25-32 °C dari 0,75 mmol/g menjadi 5,71 mmol/g. Akan tetapi, pada suhu 40 °C kapasitasnya menurun menjadi 0,381 mmol/g. Penelitian yang lain menunjukkan bahwa adsorpsi CO<sub>2</sub> oleh zeolit-13X meningkat dari suhu 21-30 °C, tetapi pada suhu 40 °C terjadi penurunan dari 51,24 mmol/g menjadi 25,46 mmol/g dengan model kinetika proses adsorpsinya mengikuti model proses difusi intra partikel (Lee dkk., 2002). Oleh karena itu, suhu adsorpsi CO<sub>2</sub> pada ZX-Nanas yang optimum terjadi pada suhu 30 °C.



Gambar 4.14 Plot model kinetika orde satu semu pada variasi suhu adsorpsi:  
 (■) 30 °C, (●) 40 °C, (▲) 50 °C.



Gambar 4.15 Plot model kinetika orde dua semu pada variasi suhu adsorpsi  
 (■) 30 °C, (●) 40 °C, (▲) 50 °C



Gambar 4.16 Plot model difusi intra partikel pada variasi suhu adsorpsi  
( ■ ) 30 °C, ( ● ) 40 °C, ( ▲ ) 50 °C.

Tabel 4.5 Parameter model kinetika adsorpsi CO<sub>2</sub> oleh ZX-Nanas.

Model Kinetika	Parameter	Suhu		
		30 °C	40 °C	50 °C
Orde satu semu	$k_f$ (menit <sup>-1</sup> )	0,0763	0,0678	0,0770
	$q_e$ (mmol/g)	1,9981	1,8020	1,3464
	$R^2$	0,3225	0,3017	0,1874
Orde dua semu	$h$ (mmol/g menit)	1,2923	0,6176	0,4033
	$q_e$ (mmol/g)	4,8473	3,6563	3,3378
	$ks$ (g/mmol menit)	0,0550	0,0462	0,0362
	$R^2$	0,9825	0,9557	0,9016
Difusi intra partikel	$k_{id}$ (mmol/g menit <sup>0.5</sup> )	0,7342	0,5792	0,5781
	$C$	0,7994	0,2282	0,1416
	$R^2$	0,9850	0,9709	0,9557

$k_f$  = Konstanta laju orde satu semu,  $q_e$  = Kapasitas adsorpsi pada saat kesetimbangan,  $h$  = Laju penyerapan awal,  $ks$  = Konstanta laju orde dua semu,  $k_{id}$  = Konstanta laju difusi intrapartikel dan  $C$  = Ketebalan batas lapisan.

Analisis termodinamika dengan memplotkan  $\ln (P/P_0)$  terhadap  $1/T$  diperoleh hasil yang dapat dilihat pada Tabel . 4.6. Pada tabel tersebut entalpi bernilai negatif yang mengindikasikan bahwa proses adsorpsi berlangsung secara eksotermis. Nilai entalpi yang kecil  $<80$  kJ/mol menunjukkan bahwa adsorpsi ini mengikuti prinsip fisisorpsi (Cinke dkk., 2003 dan Rodrigues dkk., 2010), dimana tidak terjadi ikatan kimia antara adsorbat dengan adsorben dan hanya terjadi interaksi fisika akibat perbedaan dipole-dipole pada permukaan adsorben dengan atom-atom yang ada pada adsorbat. Harga entalpi yang didapatkan pada penelitian ini serupa dengan penelitian oleh Thiruvengkatachari dkk. (2013) untuk  $\text{CO}_2$  yang teradsorp pada karbon berkomposit sebesar 12-30 kJ/mol, dan MOF 20 kJ/mol. Material – material ini mengadsorpsi  $\text{CO}_2$  melalui proses adsorpsi fisik.

Tabel 4.6 Hasil perhitungan termodinamika

Suhu	$P_{eq}$ (bar)	$P^0$ (bar)	$\Delta H$ (kJ/mol)	$\Delta S$ (kJ/mol)	$\Delta G$ (kJ/mol)
30 °C	0,750	1	-5,092	-0,0144	-0,725
40 °C	0,800	1			-0,581
50 °C	0,850	1			-0,283

$P_{eq}$  = Tekanan saat setimbang (bar),  $P^0$  = Tekanan mutlak (bar),  $\Delta S$  = Perubahan Entropi,  $\Delta H$  = Perubahan entalpi,  $\Delta G$  = Perubahan energi bebas Gibbs.

Nilai perubahan entropi ( $\Delta S$ ) yang didapatkan di dalam penelitian ini bernilai negatif. Hasil ini menunjukkan bahwa molekul  $\text{CO}_2$  teradsorpsi ke dalam material ZX-Nanas dengan keteraturan yang tinggi di dalam kerangka adsorben (Hauchhum dkk., 2014). Penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa entropi untuk adsorpsi  $\text{CO}_2$  ke dalam material zeolit NaX lebih negatif dibandingkan zeolit NaY. Nilai entropi yang semakin negatif tersebut diakibatkan oleh jumlah kation  $\text{Na}^+$  di dalam kerangka zeolit-X lebih banyak dibandingkan zeolit-Y. Kation  $\text{Na}^+$  akan membatasi pergerakan molekul  $\text{CO}_2$  di dalam material ZX-Nanas dan berinteraksi dengan momen kuadropol  $\text{CO}_2$  (Yoshimura dkk., 2013 dan Zhang dkk., 2014).

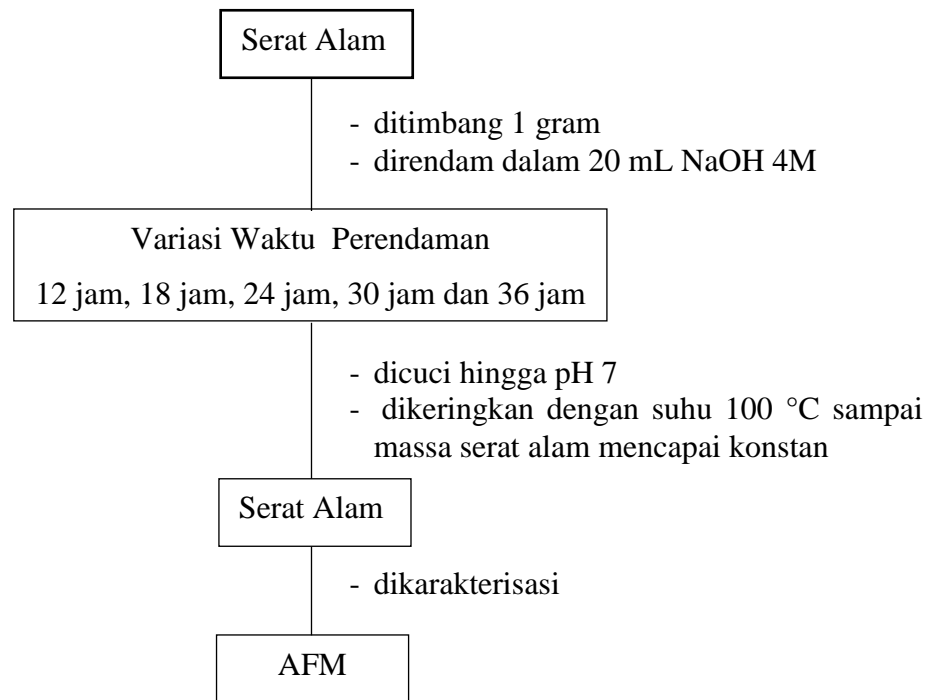
Nilai perubahan energi bebas Gibbs ( $\Delta G$ ) yang diperoleh dalam penelitian ini juga bernilai negatif yang mengindikasikan bahwa adsorpsi berlangsung secara spontan tanpa memerlukan energi dari luar. Harga energi bebas Gibbs ( $\Delta G$ )

semakin mendekati nilai positif seiring dengan kenaikan suhu. Hal ini menunjukkan bahwa adsorpsi CO<sub>2</sub> ke dalam material ZX-Nanas semakin sulit terjadi pada suhu yang lebih tinggi. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Hauchhum dkk., (2014) menunjukkan bahwa adsorpsi CO<sub>2</sub> oleh zeolit, memiliki nilai  $\Delta G$  yang semakin tinggi dari 35 °C sampai 60 °C. Peningkatan ini mulai dari -7,689 kJ/mol menjadi 6,239 kJ/mol. Nilai ini lebih kecil dibandingkan dengan nilai yang diperoleh pada penelitian ini. Hal ini terjadi karena zeolit-13X memiliki luas permukaan yang lebih tinggi daripada ZX-Nanas yaitu 726 m<sup>2</sup>/g yang menyebabkan reaksi adsorpsi lebih spontan terjadi (Lee dkk., 2002).

## LAMPIRAN

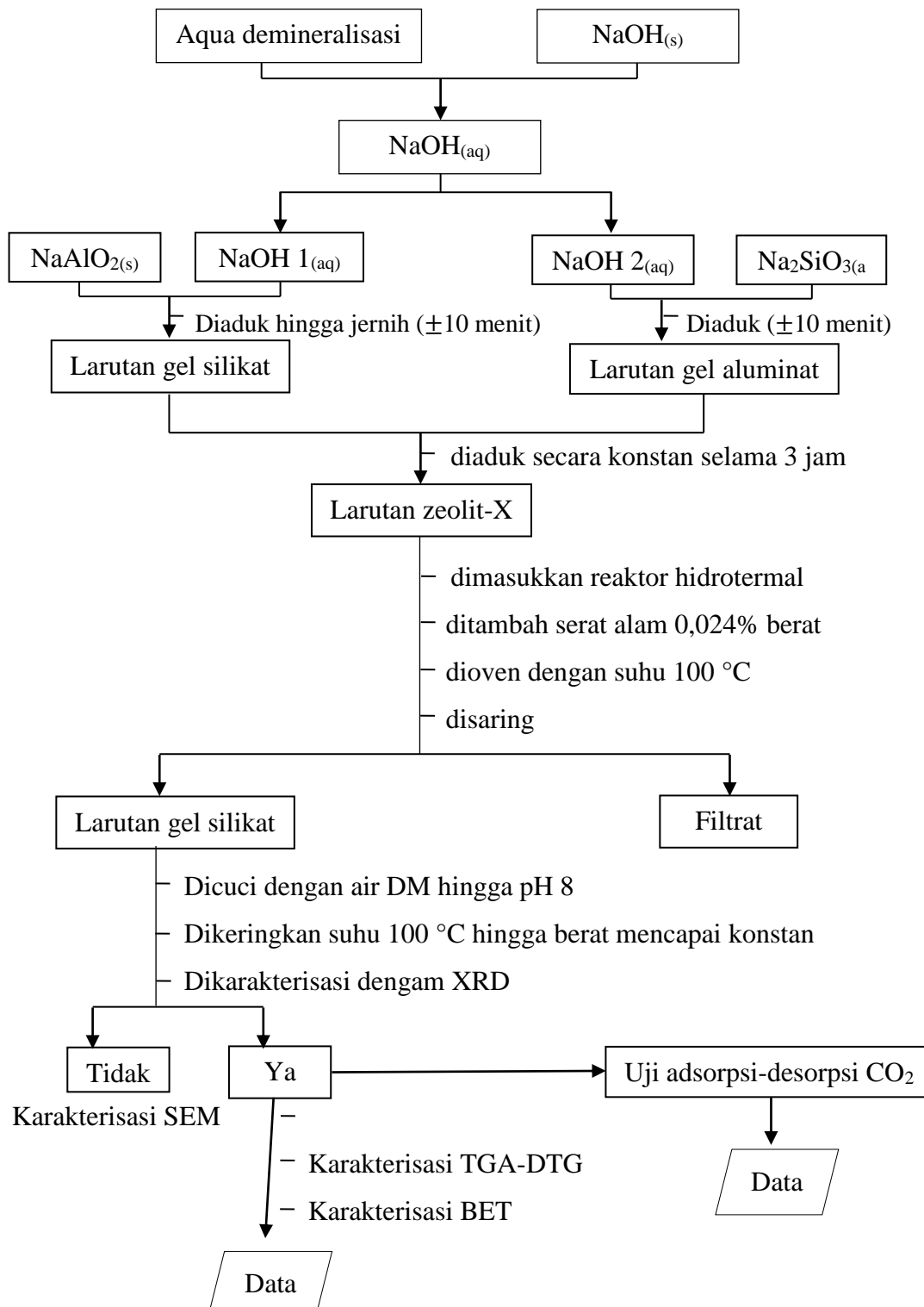
### LAMPIRAN A : SKEMA KERJA

#### 1. Aktivasi Serat Alam dengan Larutan NaOH



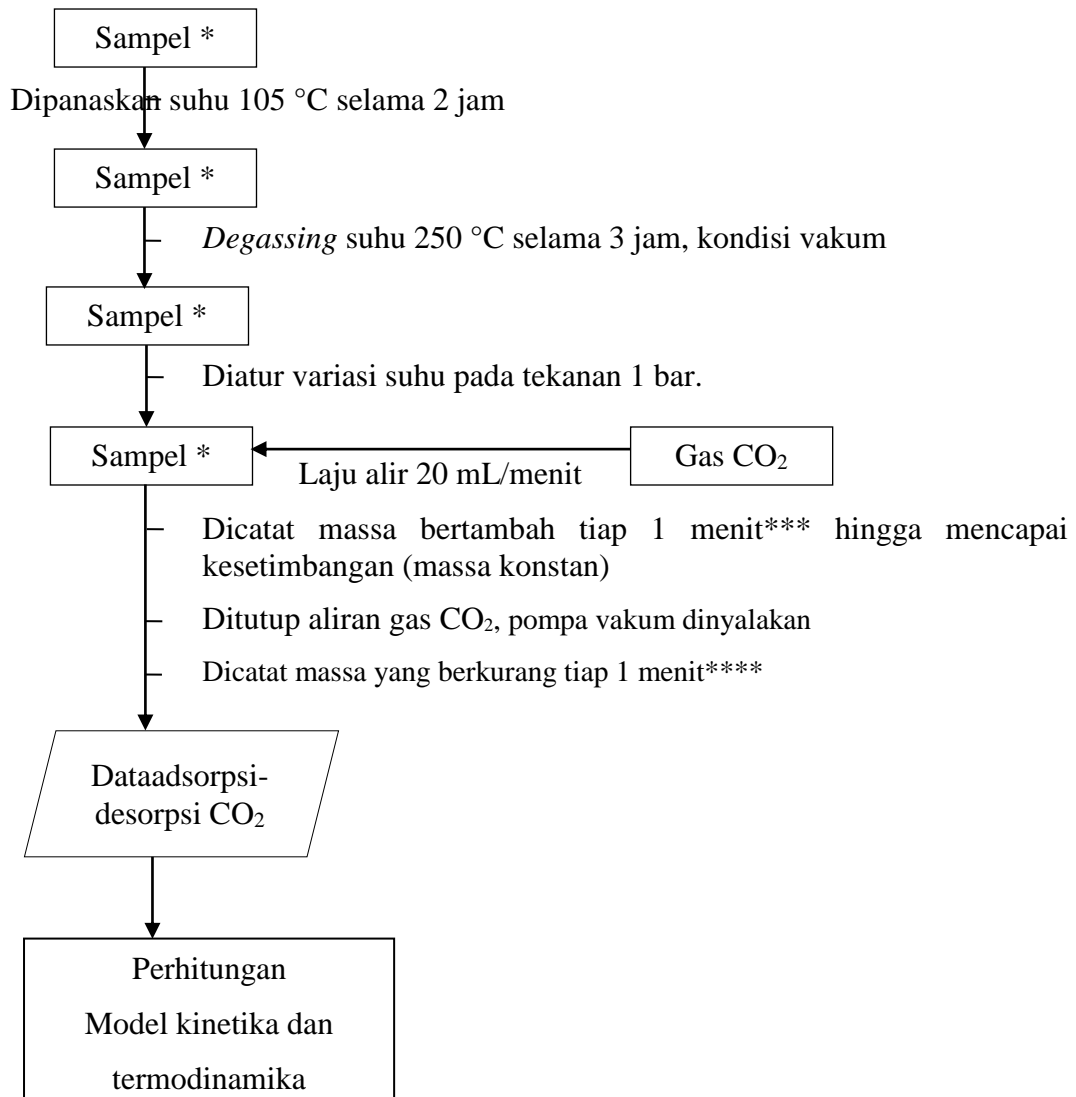
Gambar A.1 Skema kerja aktivasi serat alam.

## 2. Sintesis Zeolit-X Berpendukung Serat Alam



Gambar A.2 Skema kerja sintesis zeolit-X berpendukung serat

### 3. Uji Adsorpsi-Desorpsi CO<sub>2</sub>



Keterangan :

\* = zeolit-X berpendukung serat alam.

\*\* = Variasi suhu adsorpsi-desorpsi 30 °C, 40 °C dan 50 °C pada tekanan 1 bar.

\*\*\* = Massa yang bertambah saat proses adsorpsi

\*\*\*\* = Massa yang berkurang saat proses desorpsi

Gambar A.3 Skema kerja adsorpsi-desorpsi CO<sub>2</sub>



## LAMPIRAN B : PERHITUNGAN LARUTAN SINTESIS ZEOLIT X

### 1. Komposisi bahan

- NaAlO<sub>2</sub> terdiri dari Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 53%

$$\text{Na}_2\text{O} = 42,5\%$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,05\% \text{ (diabaikan)}$$

- Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> terdiri dari Na<sub>2</sub>O = 17,75%

$$\text{SiO}_2 = 34,25 \%$$

$$\text{H}_2\text{O} = 48\%$$

### 2. Rasio komposisi molar dari zeolit X

Rasio komposisi molar yang digunakan untuk sintesis zeolit X berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Zhang dkk.(2013) yaitu:

$$4 \text{ Na}_2\text{O} : 0,2 \text{ Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2 : 200 \text{ H}_2\text{O}$$

### 3. Perhitungan massa yang dibutuhkan pada masing-masing bahan

- **0,2 mol Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

- Massa Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang dibutuhkan :

$$m = n \times \text{Mr} = 0,2 \text{ mol} \times 101,96 \text{ gr/mol} = 20,392 \text{ gram}$$

- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dalam bahan NaAlO<sub>2</sub> sebanyak 53%

Maka, massa NaAlO<sub>2</sub> yang dibutuhkan adalah :

$$\text{Massa NaAlO}_2 = \frac{\text{massa Al}_2\text{O}_3}{\% \text{ Al}_2\text{O}_3} = \frac{20,392}{53\%} = 38,47547 \text{ gram}$$

- **1 mol SiO<sub>2</sub>**

- Massa SiO<sub>2</sub> yang dibutuhkan :

$$m = n \times \text{Mr} = 1 \text{ mol} \times 60 \text{ gr/mol} = 60 \text{ gram}$$

- SiO<sub>2</sub> dalam bahan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> sebanyak 34,25%

Maka, massa Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> yang dibutuhkan adalah :

$$\text{Massa Na}_2\text{SiO}_3 = \frac{\text{massa SiO}_2}{\% \text{ SiO}_2} = \frac{60}{34,25\%} = 175,1825 \text{ gram}$$

- **200 mol H<sub>2</sub>O**

- Massa H<sub>2</sub>O yang dibutuhkan :

$$m = n \times Mr = 200 \text{ mol} \times 18 \text{ gr/mol} = 3600 \text{ gram}$$

- H<sub>2</sub>O dalam bahan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> sebanyak 48%

$$\text{Massa H}_2\text{O dalam Na}_2\text{SiO}_3 = 48\% \times 175,1825 \text{ g} = 84,0876 \text{ gram}$$

- Maka, massa H<sub>2</sub>O yang perlu ditambah dari air DM adalah:

$$3600 \text{ gram} - 84,0876 \text{ gram} = 3515,9124 \text{ gram}$$

#### ▪ 4 mol Na<sub>2</sub>O

- Na<sub>2</sub>O dalam bahan NaAlO<sub>2</sub> sebanyak 42,5%

Massa Na<sub>2</sub>O dalam NaAlO<sub>2</sub> :

$$42,5\% \times 38,47547 \text{ gram} = 16,35208 \text{ gram}$$

$$\text{Mol Na}_2\text{O dalam NaAlO}_2 = \frac{16,35208 \text{ g}}{62 \text{ g/mol}} = 0,2637 \text{ mol}$$

- Na<sub>2</sub>O dalam bahan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> sebanyak 17,75%

Massa Na<sub>2</sub>O dalam Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> :

$$17,75\% \times 175,1825 \text{ gram} = 31,09489 \text{ gram}$$

$$\text{Mol Na}_2\text{O dalam Na}_2\text{SiO}_3 = \frac{31,09489 \text{ g}}{62 \text{ g/mol}} = 0,50153 \text{ mol}$$

- Total mol Na<sub>2</sub>O yang telah ada :

$$0,2637 \text{ mol} + 0,50153 \text{ mol} = 0,76528 \text{ mol}$$

Jadi, mol Na<sub>2</sub>O yang perlu ditambahkan :

$$4 \text{ mol} - 0,76528 \text{ mol} = 3,23472 \text{ mol}$$

- Sumber Na<sub>2</sub>O yang digunakan adalah NaOH, sehingga mol Na<sub>2</sub>O yang ditambahkan dikalikan 2 :

$$2 \times 3,23472 \text{ mol} = 6,46944 \text{ mol}$$

- Massa NaOH yang ditambahkan sebanyak :

$$m = n \times Mr$$

$$m_{\text{NaOH}} = 6,46944 \text{ mol} \times 40 \text{ gram/mol} = 258,7776 \text{ gram}$$

▪ Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, massa bahan yang digunakan untuk sintesis zeolit X masing-masing sebanyak :

$$\text{NaAlO}_2 = 38,47547 \text{ gram}$$

$$\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 175,1825 \text{ gram}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 3515,9124 \text{ gram}$$

$$\text{NaOH} = \pm 258,7776 \text{ gram}$$

- Tetapi, pada penelitian ini digunakan massa yang lebih kecil sebanyak  $\frac{1}{4}$  resep dari perhitungan massa, sehingga didapatkan komposisi masa bahan sebagai berikut :

$$\text{NaAlO}_2 = 1,53902 \text{ gram}$$

$$\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 7,0073 \text{ gram}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 140,6365 \text{ gram}$$

$$\text{NaOH} = \pm 10,3511 \text{ gram}$$

- Perhitungan material serat didapatkan dari jumlah total massa bahan yang digunakan dalam sintesis zeolit X :

$$\text{NaAlO}_2 = 1,5390 \text{ gram}$$

$$\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 7,0073 \text{ gram}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 140,6365 \text{ gram}$$

$$\text{NaOH} = \underline{10,3511 \text{ gram}} +$$

$$\text{Total} = \mathbf{159,5339 \text{ gram}}$$

- Massa material serat alam yang ditambahkan :

$$0,024\% \text{ berat} = 0,0383 \text{ gram}$$

**LAMPIRAN C: DATA DIFRAKTOGRAM XRD ZEOLIT-X  
BERPENDUKUNGAN SERAT ALAM**

**1. ZX-Kapas**

Tabel C.1a XRD ZX-Kapas 12 Jam

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
6.0876	758.16	0.1506	14.51886	100.00
9.8558	229.56	0.0836	8.97456	30.28
11.5788	138.23	0.0836	7.64273	18.23
15.2973	115.69	0.1338	5.79223	15.26
18.3141	22.04	0.2676	4.84436	2.91
19.9662	51.45	0.1338	4.44708	6.79
22.4019	39.73	0.2007	3.96877	5.24
23.2251	140.06	0.1171	3.82993	18.47
23.4846	104.51	0.1673	3.78819	13.78
24.1691	30.77	0.2007	3.68244	4.06
26.5285	87.17	0.1338	3.36004	11.50
29.3159	16.38	0.4684	3.04660	2.16
30.2321	30.20	0.4015	2.95633	3.98
30.8272	87.45	0.1673	2.90060	11.53
31.9662	39.75	0.4684	2.79980	5.24
33.4698	52.73	0.1004	2.67739	6.96
37.4771	22.83	0.4015	2.39980	3.01
41.2515	11.89	0.5353	2.18853	1.57
46.9868	6.56	0.8029	1.93390	0.86
48.9095	7.41	0.6691	1.86228	0.98

Tabel C.1b XRD ZX-Kapas 18 Jam

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
6.0360	1277.20	0.1171	14.64283	100.00
9.9105	265.63	0.0836	8.92518	20.80
11.6514	172.52	0.1004	7.59527	13.51
15.3475	192.09	0.0836	5.77342	15.04
18.3577	30.75	0.1673	4.83296	2.41
19.9874	95.58	0.0502	4.44241	7.48
23.2091	189.53	0.1171	3.83254	14.84
26.5437	156.05	0.0836	3.35816	12.22
27.0640	95.58	0.2676	3.29477	7.48
29.2878	14.83	0.6691	3.04946	1.16
30.2452	68.14	0.1338	2.95508	5.34
30.8828	184.24	0.1004	2.89551	14.43
31.3232	153.19	0.2342	2.85580	11.99
31.8943	56.97	0.1673	2.80595	4.46
32.3535	62.52	0.2007	2.76717	4.90
33.5216	57.28	0.1673	2.67336	4.48
33.9558	69.57	0.2007	2.64017	5.45
37.7720	35.47	0.3346	2.38174	2.78
41.1754	49.32	0.2007	2.19240	3.86
42.8906	22.84	0.3346	2.10861	1.79
46.6969	15.09	0.6691	1.94523	1.18

Tabel C.1c XRD ZX-Kapas 24 Jam

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
6.0765	2432.74	0.1506	14.54524	100.00
9.9373	758.16	0.1004	8.90115	31.16
11.6666	588.12	0.1338	7.58539	24.18
15.3650	800.54	0.1171	5.76688	32.91
18.3432	178.69	0.1004	4.83674	7.35
20.0060	368.51	0.1004	4.43834	15.15
20.9294	77.90	0.1171	4.24455	3.20
22.4028	180.24	0.1171	3.96862	7.41
23.2387	1005.66	0.1171	3.82773	41.34
23.5298	163.35	0.1004	3.78103	6.71
24.0093	34.08	0.1004	3.70658	1.40
24.5732	32.31	0.1673	3.62279	1.33
25.3767	37.81	0.1673	3.50988	1.55
26.5812	927.08	0.1506	3.35350	38.11
27.3317	49.29	0.1338	3.26310	2.03
29.1317	180.02	0.1338	3.06545	7.40
30.2214	413.91	0.0836	2.95735	17.01
30.8671	983.71	0.1020	2.89455	40.44
30.9470	737.92	0.0612	2.89443	30.33
31.9129	460.82	0.1020	2.80203	18.94
32.5482	92.60	0.1224	2.74878	3.81
33.5170	471.17	0.0816	2.67151	19.37
34.0925	174.94	0.0816	2.62772	7.19
35.0942	55.82	0.2040	2.55498	2.29
36.5680	28.71	0.2448	2.45531	1.18
37.2633	199.55	0.0612	2.41108	8.20
38.7265	24.33	0.2448	2.32328	1.00
39.9222	44.82	0.2040	2.25641	1.84
40.7366	152.94	0.1224	2.21316	6.29
41.2097	158.07	0.0612	2.18884	6.50
42.5194	115.73	0.0816	2.12440	4.76
43.3472	45.73	0.1224	2.08573	1.88
45.0173	10.59	0.4896	2.01216	0.44
46.3914	72.28	0.0816	1.95570	2.97
46.9833	67.59	0.1224	1.93243	2.78
48.6037	42.71	0.0612	1.87173	1.76

Tabel C.1d XRD ZX-Kapas 30 Jam

Pos. [ $^{\circ}$ 2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [ $^{\circ}$ 2Th.]	d-spacing [ $\text{\AA}$ ]	Rel. Int. [%]
6.0724	1744.57	0.1004	14.55515	100.00
9.9242	362.99	0.1171	8.91289	20.81
11.7022	231.63	0.1338	7.56237	13.28
15.3842	321.28	0.0836	5.75974	18.42
18.3918	63.14	0.1338	4.82406	3.62
20.0183	135.02	0.0669	4.43564	7.74
21.0003	32.41	0.1004	4.23038	1.86
22.4517	88.15	0.0836	3.96008	5.05
23.2381	334.22	0.0836	3.82782	19.16
23.5379	106.18	0.1338	3.77973	6.09
26.6293	292.80	0.1338	3.34755	16.78
29.1385	68.71	0.0669	3.06475	3.94
30.2125	104.05	0.0836	2.95820	5.96
30.8635	266.64	0.1506	2.89727	15.28
31.9041	109.53	0.0669	2.80511	6.28
33.5074	112.81	0.0669	2.67447	6.47
34.1366	43.49	0.1338	2.62660	2.49
37.2769	56.90	0.2007	2.41223	3.26
40.7271	38.60	0.1004	2.21549	2.21
41.2206	44.92	0.1338	2.19010	2.57
42.5739	26.48	0.1673	2.12357	1.52
46.4316	19.89	0.2007	1.95572	1.14

Tabel C.1e XRD ZX-Kapas 36 Jam

Pos. [ $^{\circ}$ 2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [ $^{\circ}$ 2Th.]	d-spacing [ $\text{\AA}$ ]	Rel. Int. [%]
6.0597	1276.68	0.0836	14.58564	100.00
9.9407	229.63	0.1171	8.89816	17.99
11.6680	183.20	0.1004	7.58448	14.35
15.3747	169.49	0.0836	5.76327	13.28
18.2936	27.49	0.2007	4.84973	2.15
19.9683	61.21	0.1004	4.44662	4.79
22.4725	40.08	0.2007	3.95647	3.14
23.2580	154.69	0.1338	3.82460	12.12
23.5872	89.20	0.2007	3.77195	6.99
26.5913	104.39	0.1004	3.35225	8.18
26.8708	93.90	0.1004	3.31801	7.36
29.3935	16.38	0.5353	3.03873	1.28
30.8634	127.78	0.0669	2.89729	10.01
31.2659	104.78	0.2007	2.86090	8.21
31.9501	54.43	0.1004	2.80118	4.26
32.3024	41.21	0.2676	2.77143	3.23
33.5804	45.54	0.2007	2.66882	3.57
34.0481	51.69	0.2007	2.63323	4.05
37.6878	30.94	0.2676	2.38687	2.42
41.4050	27.24	0.6691	2.18077	2.13
42.9338	17.26	0.5353	2.10659	1.35

## 2. ZX-Kapuk

Tabel C.2a XRD ZX-Kapuk 12 Jam

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
6.0611	646.18	0.0502	14.58229	100.00
9.8727	102.69	0.1338	8.95926	15.89
11.5986	47.88	0.3346	7.62971	7.41
15.3125	61.62	0.1338	5.78653	9.54
18.6069	6.98	0.5353	4.76878	1.08
20.0977	17.91	0.4015	4.41829	2.77
23.4956	49.54	0.3346	3.78646	7.67
26.6164	38.51	0.2676	3.34914	5.96
26.9042	43.44	0.2007	3.31397	6.72
31.2889	58.92	0.1338	2.85885	9.12
32.3692	17.73	0.2007	2.76586	2.74
33.9412	42.03	0.1673	2.64127	6.50
37.6297	25.55	0.2007	2.39042	3.95
41.1103	28.48	0.2007	2.19572	4.41
41.6320	28.81	0.1673	2.16940	4.46
42.8195	7.86	0.4015	2.11195	1.22
46.7471	10.74	0.2676	1.94326	1.66

Tabel C.2b XRD ZX- Kapuk 18 Jam

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
6.0549	838.60	0.0836	14.59704	100.00
6.3123	378.14	0.1004	14.00248	45.09
9.9300	125.10	0.1338	8.90772	14.92
10.2444	67.21	0.1004	8.63506	8.01
11.6881	82.41	0.1338	7.57147	9.83
11.9364	65.66	0.1338	7.41456	7.83
15.7408	125.75	0.2007	5.63004	15.00
18.7240	44.03	0.2342	4.73923	5.25
20.4376	70.43	0.2676	4.34556	8.40
21.1506	17.49	0.4015	4.20067	2.09
22.7868	51.33	0.2007	3.90261	6.12
23.2203	92.92	0.1004	3.83072	11.08
23.6184	273.49	0.2342	3.76704	32.61
26.5926	81.37	0.1004	3.35210	9.70
26.9859	299.30	0.1840	3.30412	35.69
29.5193	62.84	0.2676	3.02608	7.49
30.2028	45.65	0.1004	2.95913	5.44
30.6663	149.78	0.2007	2.91546	17.86
31.2093	346.72	0.1020	2.86358	41.35
31.3156	364.92	0.0836	2.85647	43.52
32.3448	153.24	0.2007	2.76789	18.27
32.9917	43.16	0.2676	2.71508	5.15
33.9246	171.93	0.1338	2.64253	20.50
34.4678	65.11	0.2007	2.60211	7.76
35.4884	44.47	0.1338	2.52959	5.30
37.6844	67.34	0.2007	2.38708	8.03
39.0772	11.22	0.4015	2.30515	1.34
40.1047	12.73	0.4015	2.24843	1.52
41.1877	63.54	0.2676	2.19178	7.58
41.6393	46.61	0.2007	2.16904	5.56
42.9617	35.42	0.2007	2.10529	4.22
46.7335	16.18	0.4015	1.94379	1.93

Tabel C.2c XRD ZX- Kapuk 24 Jam

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
6.0916	2752.63	0.1004	14.50932	100.00
7.1275	125.16	0.2007	12.40260	4.55
9.9527	839.28	0.1004	8.88741	30.49
11.6830	655.60	0.1004	7.57476	23.82
12.3832	33.30	0.2007	7.14799	1.21
15.3752	934.17	0.1171	5.76306	33.94
18.3703	219.51	0.1004	4.82967	7.97
19.9986	411.87	0.0669	4.43996	14.96
20.9383	96.08	0.0669	4.24276	3.49
21.6745	36.95	0.1004	4.10030	1.34
22.3855	208.64	0.1171	3.97165	7.58
23.2308	1193.31	0.1171	3.82901	43.35
23.5186	192.93	0.0669	3.78280	7.01
23.9932	40.94	0.2007	3.70904	1.49
24.5791	33.85	0.1338	3.62194	1.23
25.3672	51.14	0.1338	3.51118	1.86
26.5755	1239.19	0.0836	3.35421	45.02
27.3365	69.74	0.1004	3.26254	2.53
29.1448	217.85	0.1171	3.06410	7.91
29.9343	69.67	0.1338	2.98506	2.53
30.2232	541.21	0.0669	2.95719	19.66
30.8666	1276.02	0.1020	2.89459	46.36
30.9597	775.39	0.0612	2.89328	28.17
31.9067	565.65	0.0816	2.80257	20.55
32.5211	132.41	0.0612	2.75101	4.81
33.5067	555.18	0.0612	2.67231	20.17
33.6074	382.80	0.0612	2.67115	13.91
34.1008	225.10	0.1020	2.62710	8.18
35.0926	65.53	0.1632	2.55509	2.38
37.2578	269.14	0.0816	2.41142	9.78
37.3690	164.98	0.0612	2.41048	5.99
38.7481	17.30	0.2448	2.32204	0.63
39.8972	49.95	0.1632	2.25777	1.81
40.7125	181.16	0.0612	2.21442	6.58
41.2063	177.67	0.0612	2.18901	6.45
41.3198	125.59	0.0612	2.18869	4.56
42.5073	151.28	0.0816	2.12498	5.50
43.3095	50.62	0.1020	2.08746	1.84
46.3972	83.47	0.0816	1.95547	3.03
46.9910	95.34	0.0612	1.93214	3.46
48.6114	43.43	0.0816	1.87145	1.58
49.7399	42.78	0.1224	1.83160	1.55



Tabel C.2d XRD ZX- Kapuk 30 Jam

Pos. [ $^{\circ}$ 2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [ $^{\circ}$ 2Th.]	d-spacing [ $\text{\AA}$ ]	Rel. Int. [%]
6.0403	782.62	0.0669	14.63247	100.00
6.2378	642.66	0.0836	14.16961	82.12
10.1126	124.26	0.1338	8.74724	15.88
11.6437	71.92	0.1673	7.60022	9.19
11.8682	68.52	0.1338	7.45698	8.76
15.6045	106.75	0.3011	5.67889	13.64
18.5247	25.41	0.3346	4.78975	3.25
20.0404	59.10	0.1004	4.43079	7.55
20.2467	65.49	0.1004	4.38611	8.37
22.6235	43.83	0.2676	3.93040	5.60
23.4071	175.88	0.3346	3.80057	22.47
26.7309	177.53	0.2342	3.33506	22.68
29.3969	38.63	0.3346	3.03839	4.94
30.3836	93.85	0.1004	2.94193	11.99
31.0515	206.63	0.1004	2.88016	26.40
32.0753	87.19	0.2007	2.79053	11.14
33.7155	104.54	0.1673	2.65844	13.36
34.4299	36.89	0.3346	2.60489	4.71
35.3297	13.96	0.4015	2.54059	1.78
37.4545	44.80	0.4015	2.40120	5.72
40.9597	31.93	0.2676	2.20345	4.08
41.6914	34.12	0.4015	2.16645	4.36
42.8157	27.10	0.4015	2.11213	3.46
46.6304	18.15	0.3346	1.94785	2.32

Tabel C.2e XRD ZX- Kapuk 36 Jam

Pos. [ $^{\circ}$ 2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [ $^{\circ}$ 2Th.]	d-spacing [ $\text{\AA}$ ]	Rel. Int. [%]
5.9948	883.14	0.0669	14.74338	100.00
6.2995	636.39	0.1506	14.03081	72.06
9.8482	259.47	0.0669	8.98147	29.38
10.1287	144.86	0.1338	8.73338	16.40
11.5873	151.12	0.1004	7.63715	17.11
11.9369	87.85	0.1338	7.41423	9.95
15.2904	219.30	0.0669	5.79484	24.83
15.6756	116.70	0.2007	5.65330	13.21
18.2838	45.21	0.1004	4.85233	5.12
18.7018	39.93	0.2342	4.74480	4.52
19.9186	62.14	0.1338	4.45761	7.04
20.2748	75.96	0.2342	4.38010	8.60
23.1704	192.61	0.1004	3.83885	21.81
23.5023	254.95	0.2342	3.78538	28.87
26.5155	153.60	0.0502	3.36167	17.39
26.8888	252.19	0.0836	3.31583	28.56
29.1011	39.45	0.1004	3.06860	4.47
29.5673	44.75	0.2007	3.02127	5.07
30.1638	62.42	0.1004	2.96287	7.07
30.4865	115.56	0.1673	2.93224	13.09
30.8242	160.88	0.1004	2.90088	18.22
31.1564	282.27	0.1171	2.87071	31.96
31.8644	73.02	0.1004	2.80852	8.27
32.2354	131.03	0.1673	2.77704	14.84
33.8266	138.27	0.1673	2.64996	15.66
34.4598	66.23	0.2676	2.60270	7.50
35.4201	25.44	0.2007	2.53431	2.88
37.6367	65.14	0.2676	2.38999	7.38
41.1087	70.16	0.2007	2.19580	7.94
41.6997	53.90	0.1338	2.16604	6.10
42.8144	39.49	0.2007	2.11219	4.47
43.6503	23.54	0.2007	2.07366	2.67
46.7815	32.81	0.3346	1.94191	3.72
47.3748	38.86	0.2007	1.91896	4.40
48.9474	19.11	0.4015	1.86093	2.16

### 3. ZX-Nanas

Tabel C.3a XRD ZX-Nanas 12 Jam

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
6.1227	1633.86	0.1171	14.43570	100.00
9.9730	283.03	0.1004	8.86939	17.32
10.1722	204.06	0.1338	8.69619	12.49
11.6885	175.56	0.1673	7.57124	10.75
11.9518	138.23	0.1338	7.40500	8.46
15.4632	305.86	0.1673	5.73050	18.72
15.6726	253.83	0.1338	5.65437	15.54
18.6613	76.01	0.1338	4.75502	4.65
20.0957	157.27	0.1673	4.41872	9.63
20.2907	163.17	0.1338	4.37669	9.99
21.1956	40.28	0.2676	4.19184	2.47
22.6849	117.65	0.1673	3.91990	7.20
23.2939	397.94	0.1673	3.81878	24.36
23.5261	564.27	0.1004	3.78160	34.54
25.4042	22.28	0.2676	3.50614	1.36
26.7041	455.90	0.1673	3.33834	27.90
26.8712	486.27	0.0502	3.31797	29.76
27.4823	38.77	0.2676	3.24557	2.37
29.4394	126.33	0.1338	3.03410	7.73
30.4828	248.70	0.3011	2.93258	15.22
31.0443	614.07	0.1224	2.87843	37.58
31.1462	555.33	0.1004	2.87162	33.99
32.1563	269.00	0.1004	2.78368	16.46
32.7607	68.77	0.2007	2.73370	4.21
33.6938	268.23	0.3346	2.66010	16.42
34.2245	108.85	0.2676	2.62005	6.66
35.2892	62.14	0.1338	2.54341	3.80
37.5086	123.44	0.3680	2.39786	7.56
38.8657	17.24	0.4015	2.31720	1.06
40.1097	33.29	0.2676	2.24816	2.04
40.8393	96.65	0.1673	2.20966	5.92
41.4131	95.70	0.2676	2.18036	5.86
42.7498	70.06	0.3011	2.11524	4.29
43.5490	35.07	0.2342	2.07825	2.15
46.5716	42.38	0.2676	1.95017	2.59
47.1674	49.68	0.1338	1.92692	3.04
48.8070	27.28	0.2676	1.86595	1.67

Tabel C.3b XRD ZX- Nanas 18 Jam

Pos. [ $^{\circ}$ 2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [ $^{\circ}$ 2Th.]	d-spacing [ $\text{\AA}$ ]	Rel. Int. [%]
6.1119	2340.91	0.1840	14.46119	100.00
9.9605	609.00	0.0836	8.88053	26.02
11.6953	428.09	0.1004	7.56681	18.29
12.5014	41.54	0.2676	7.08068	1.77
15.4050	676.68	0.1171	5.75199	28.91
17.5062	16.89	0.4015	5.06607	0.72
18.3972	157.27	0.1004	4.82267	6.72
20.0409	318.63	0.1171	4.43067	13.61
20.9964	70.19	0.1338	4.23116	3.00
21.7516	49.15	0.1673	4.08593	2.10
22.4369	167.32	0.1004	3.96266	7.15
23.2646	844.55	0.1004	3.82351	36.08
24.6535	35.86	0.1338	3.61118	1.53
25.4400	43.71	0.1338	3.50128	1.87
26.6339	812.39	0.1338	3.34699	34.70
27.3920	62.93	0.2007	3.25606	2.69
29.1968	173.54	0.2007	3.05876	7.41
30.2508	314.92	0.1338	2.95454	13.45
30.8928	783.87	0.0816	2.89220	33.49
30.9934	905.70	0.1171	2.88543	38.69
31.9516	389.32	0.0816	2.79873	16.63
32.0619	396.80	0.0669	2.79166	16.95
32.5861	111.11	0.1338	2.74795	4.75
33.5475	376.82	0.0816	2.66915	16.10
33.6471	428.96	0.1004	2.66368	18.32
34.2541	164.85	0.0836	2.61786	7.04
35.1874	78.84	0.2007	2.55053	3.37
36.6522	26.28	0.2007	2.45189	1.12
37.3359	190.71	0.2007	2.40855	8.15
38.7943	20.31	0.2007	2.32130	0.87
40.0205	37.18	0.2007	2.25296	1.59
40.8085	132.17	0.2007	2.21126	5.65
41.3115	129.00	0.2007	2.18549	5.51
42.6035	101.27	0.2007	2.12216	4.33
43.3736	43.03	0.2342	2.08625	1.84
46.4548	69.50	0.1673	1.95480	2.97
47.0415	55.47	0.1224	1.93018	2.37
47.1762	62.66	0.1004	1.92658	2.68
48.7316	25.15	0.2007	1.86866	1.07

Tabel C.3c XRD ZX- Nanas 24 Jam

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
6.1276	2996.55	0.1171	14.42405	100.00
9.9791	928.79	0.1338	8.86395	31.00
11.7441	595.40	0.1506	7.53550	19.87
12.4041	29.59	0.1673	7.13600	0.99
15.4364	954.89	0.1506	5.74036	31.87
18.3975	248.23	0.1004	4.82259	8.28
20.0733	504.74	0.1338	4.42361	16.84
20.9788	115.40	0.1171	4.23468	3.85
22.4509	268.61	0.1506	3.96022	8.96
23.2937	1407.80	0.1506	3.81881	46.98
23.5666	229.02	0.0836	3.77520	7.64
24.6220	45.36	0.1673	3.61573	1.51
25.4072	59.05	0.1338	3.50573	1.97
26.6336	1272.28	0.1338	3.34703	42.46
27.3659	87.16	0.1004	3.25910	2.91
29.2326	261.63	0.0669	3.05509	8.73
30.2825	548.86	0.1171	2.95153	18.32
30.9472	1449.13	0.1673	2.88963	48.36
31.9804	623.16	0.1506	2.79860	20.80
32.5610	122.28	0.1673	2.75001	4.08
33.5508	597.68	0.1004	2.67111	19.95
34.1900	244.72	0.1338	2.62262	8.17
35.1400	99.27	0.1338	2.55386	3.31
36.5852	27.58	0.2007	2.45623	0.92
37.3416	283.82	0.1506	2.40820	9.47
38.7219	32.05	0.2007	2.32547	1.07
39.9530	66.58	0.1673	2.25661	2.22
40.7387	186.39	0.0669	2.21489	6.22
41.2540	197.34	0.1171	2.18840	6.59
42.5346	148.72	0.0836	2.12543	4.96
43.3732	68.16	0.1673	2.08627	2.27
46.4699	107.28	0.1171	1.95420	3.58
47.0502	100.19	0.1338	1.93144	3.34
48.2031	26.02	0.1004	1.88791	0.87
48.6365	50.85	0.0669	1.87209	1.70
49.3956	15.12	0.2007	1.84509	0.50

Tabel C.3d XRD ZX- Nanas 30 Jam

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
6.0629	1794.07	0.1171	14.57791	100.00
9.9282	427.84	0.1004	8.90936	23.85
11.6595	284.69	0.0836	7.58999	15.87
12.3465	26.93	0.2676	7.16913	1.50
15.3740	380.62	0.1171	5.76352	21.22
18.3592	79.61	0.0669	4.83255	4.44
20.0131	127.04	0.1004	4.43677	7.08
20.9151	31.29	0.1004	4.24742	1.74
21.6463	13.22	0.2676	4.10557	0.74
22.4124	62.52	0.1004	3.96693	3.49
23.2971	299.66	0.1171	3.81827	16.70
23.5578	54.20	0.1171	3.77660	3.02
26.5900	358.50	0.0669	3.35241	19.98
29.1751	74.04	0.1338	3.06098	4.13
30.2314	126.86	0.0669	2.95640	7.07
30.8763	351.93	0.1004	2.89610	19.62
31.9090	141.26	0.0669	2.80469	7.87
32.6134	22.82	0.3346	2.74571	1.27
33.5249	155.83	0.0669	2.67311	8.69
34.1440	43.65	0.1673	2.62605	2.43
35.1084	21.70	0.2007	2.55609	1.21
37.2764	60.92	0.0669	2.41226	3.40
39.9457	16.42	0.2007	2.25701	0.92
40.7357	54.74	0.0669	2.21505	3.05
41.2425	42.53	0.1338	2.18899	2.37
42.5247	38.39	0.1004	2.12591	2.14
43.3280	19.49	0.2007	2.08834	1.09
46.4267	14.58	0.2676	1.95592	0.81
47.0004	19.96	0.1338	1.93337	1.11

Tabel C.3e XRD ZX- Nanas 36 Jam

Pos. [ $^{\circ}$ 2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [ $^{\circ}$ 2Th.]	d-spacing [ $\text{\AA}$ ]	Rel. Int. [%]
6.0683	915.65	0.0669	14.56479	96.37
6.2726	950.09	0.0502	14.09089	100.00
10.1771	278.10	0.1171	8.69195	29.27
12.0018	184.40	0.2007	7.37428	19.41
15.7273	295.68	0.0669	5.63485	31.12
18.6611	86.02	0.3346	4.75505	9.05
20.3042	201.01	0.2342	4.37381	21.16
21.2580	45.89	0.2007	4.17968	4.83
22.7565	111.85	0.1004	3.90772	11.77
23.5427	614.75	0.0836	3.77898	64.70
25.5657	21.89	0.4015	3.48436	2.30
26.9373	528.92	0.1673	3.30997	55.67
29.3151	127.26	0.1004	3.04669	13.39
29.5004	128.45	0.1338	3.02797	13.52
30.5425	261.53	0.1004	2.92699	27.53
31.2384	537.41	0.1673	2.86335	56.56
32.2586	248.65	0.4015	2.77509	26.17
32.7947	79.48	0.2676	2.73094	8.37
33.8826	244.57	0.0836	2.64570	25.74
34.3694	122.90	0.2342	2.60934	12.94
35.3305	50.00	0.3346	2.54053	5.26
37.4461	132.87	0.3680	2.40172	13.98
40.1627	33.17	0.2676	2.24531	3.49
40.9476	103.43	0.2342	2.20407	10.89
41.4964	103.76	0.1338	2.17618	10.92
42.8292	67.58	0.2676	2.11150	7.11
43.5456	27.93	0.3346	2.07841	2.94
46.6298	48.16	0.2676	1.94787	5.07
47.1866	43.73	0.3346	1.92618	4.60
48.8545	23.40	0.2007	1.86425	2.46

#### 4. Zeolit-X

Tabel C.4 XRD Zeolit-X

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
6.1176	2997.62	0.0836	14.44755	100.00
7.2461	168.18	0.2676	12.19989	5.61
9.9733	816.95	0.0836	8.86912	27.25
11.7189	530.35	0.1338	7.55167	17.69
12.4699	57.69	0.2007	7.09847	1.92
14.3765	17.62	0.4684	6.16110	0.59
15.4086	731.44	0.1338	5.75066	24.40
18.3966	185.64	0.0836	4.82281	6.19
20.0201	300.54	0.1171	4.43524	10.03
20.9693	81.83	0.1004	4.23658	2.73
21.7106	27.04	0.2676	4.09357	0.90
22.4065	162.11	0.1506	3.96796	5.41
23.2539	880.24	0.1338	3.82525	29.36
23.5680	161.14	0.1004	3.77498	5.38
24.0109	54.94	0.1338	3.70634	1.83
24.6452	25.12	0.2007	3.61237	0.84
25.3846	35.68	0.1338	3.50880	1.19
26.6107	851.01	0.1506	3.34986	28.39
27.3796	57.69	0.1338	3.25750	1.92
29.1607	177.69	0.1004	3.06246	5.93
30.2457	330.84	0.0669	2.95503	11.04
30.8814	821.74	0.1020	2.89324	27.41
30.9618	848.36	0.0612	2.89308	28.30
31.9292	368.03	0.1020	2.80065	12.28
32.5628	88.38	0.1224	2.74758	2.95
33.5299	387.29	0.1020	2.67051	12.92
34.1489	153.06	0.1224	2.62351	5.11
35.1321	53.25	0.2040	2.55231	1.78
36.6521	21.05	0.2448	2.44987	0.70
37.2584	137.55	0.0816	2.41139	4.59
38.6947	23.76	0.2448	2.32512	0.79
39.9185	45.83	0.2040	2.25661	1.53
40.7463	130.97	0.1632	2.21266	4.37
41.2281	107.59	0.1020	2.18791	3.59
42.5319	104.49	0.1020	2.12380	3.49
43.3513	46.12	0.1632	2.08554	1.54
46.4498	55.50	0.2448	1.95338	1.85
47.0196	52.72	0.1632	1.93103	1.76
48.2016	17.91	0.2448	1.88640	0.60
48.6474	26.87	0.1632	1.87015	0.90

#### 5. Kristalinitas relatif

- Presentase kristalinitas relatif dihitung dengan membandingkan intensitas puncak-puncak khas zeolit X berpendukung material serat alam terhadap zeolit-X tanpa serat (ZX) :

$$\% \text{ kristalinitas relatif} = \frac{\Sigma \text{ Intensitas relatif zeolit X serat}}{\Sigma \text{ intensitas relatif zeolit X}} \times 100\%$$

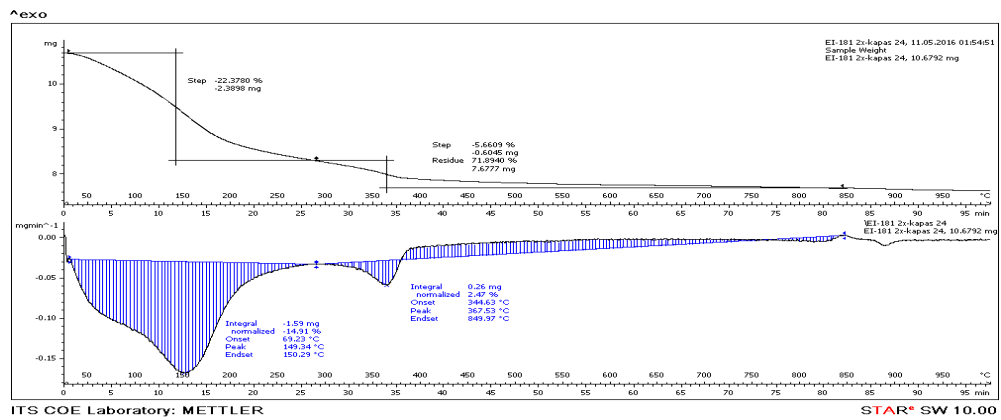


Tabel C.5. Perhitungan kristalinitas relatif

2 tetha sampel	6.1	9.9	11.7	15.5	23.3	26.6	30.9	Jumlah	Kristalinitas (%)
Zeolit X	4838	1296	955	1260	1707	1692	1748	13496	100
ZX-Kapas-12	758	230	138	116	140	87	87	1556	11.5
ZX-Kapas-18	1277	266	173	192	190	156	184	2438	18
ZX-Kapas-24	2432	758	588	800	1006	927	983	7494	55.5
ZX-Kapas-30	1744	362	232	321	334	293	267	3553	26.3
ZX-Kapas-36	1277	230	183	170	155	104	128	2247	16.6
ZX-Kapuk 12J	646	103	48	62	50	38	58	1005	7.4
ZX-Kapuk 18J	837	125	82	126	274	299	364	2107	15.6
ZX-Kapuk 24J	2753	839	655	934	1193	1239	1159	8772	65.0
ZX-Kapuk 30J	783	124	71	106	176	178	206	1644	12.2
ZX-Kapuk 36J	634	259	151	116	192	153	160	1665	12.3
ZX-Nanas-12	1634	283	176	306	398	456	614	3867	27
ZX-Nanas-18	2341	609	428	677	844	812	906	6617	49
ZX-Nanas-24	2997	929	595	954	1407	1272	1449	9603	71
ZX-Nanas-30	1795	428	285	381	300	359	352	3900	30
ZX-Nanas-36	915	278	184	295	614	529	537	3352	25

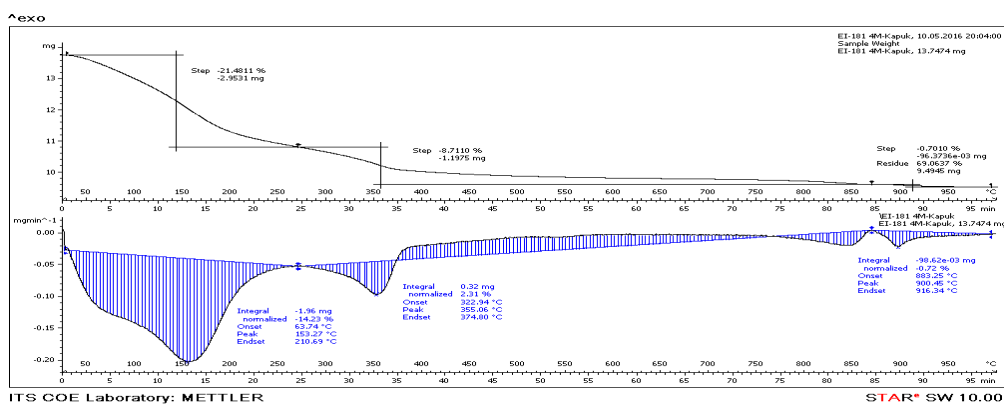
## LAMPIRAN D : DATA TGA-DTG

### 1. ZX-Kapas 24J



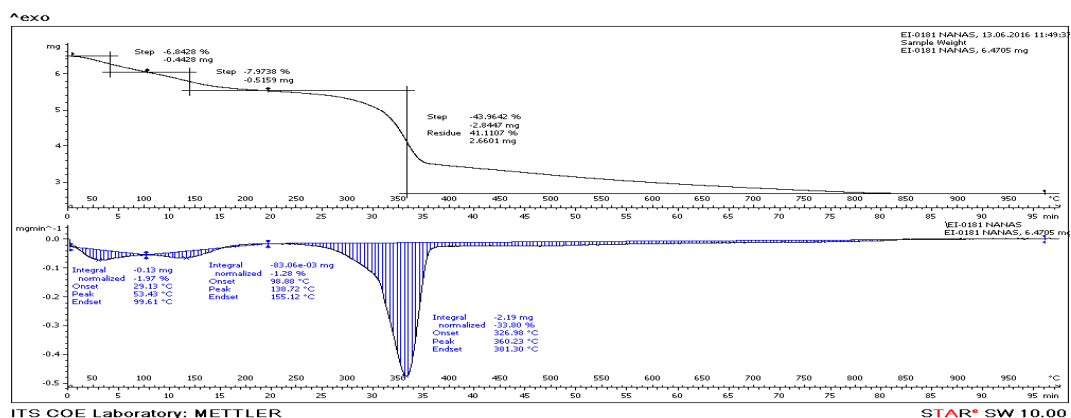
Gambar D.1 Grafik TGA-DTG ZX-Kapas 24J

### 2. ZX-Kapuk 24J



Gambar D.2 Grafik TGA-DTG ZX-Kapuk 24J

### 3. ZX-Nanas 24J



Gambar D.3 Grafik TGA-DTG ZX-Nana

## LAMPIRAN E : ADSORPSI-DESORPSI NITROGEN (BET)

### 1. Zeolit-X Tanpa Serat

ASAP 2020 V4.02 (V4.02 E)

Unit 1

Serial #: 2041

Page 3

Sample: Zeolit X  
Operator: Lab Kimia  
Submitter: UNJ  
File: C:\2020\DATA\000-007.SMP

Started: 5/14/2016 8:26:01AM  
Completed: 5/14/2016 11:43:43AM  
Report Time: 5/24/2016 9:52:39AM  
Sample Mass: 0.2200 g  
Cold Free Space: 84.4821 cm<sup>3</sup>  
Ambient Temperature: 22.00 °C  
Automatic Degas: Yes

Analysis Adsorptive: N2  
Analysis Bath Temp.: -195.785 °C  
Thermal Correction: No  
Warm Free Space: 27.3505 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration Interval: 5 s  
Low Pressure Dose: None

Isotherm Tabular Report				
Relative Pressure (P/Po)	Absolute Pressure (mmHg)	Quantity Adsorbed (cm <sup>3</sup> /g STP)	Elapsed Time (h:min)	Saturation Pressure (mmHg)
0.010086295	7.677518	185.9473	01:01	761.620911
0.061919881	47.130074	190.5806	02:00	
0.131193074	99.854172	192.0439	02:05	
0.174310736	132.669464	192.4930	02:08	
0.219875334	167.345825	192.7946	02:10	
0.268713953	204.514618	192.7946	02:12	
0.320433704	243.873077	193.0117	02:13	
0.371391654	282.652985	193.1367	02:15	
0.442339959	336.645935	193.1961	02:16	
0.493944211	375.912384	193.1653	02:17	
0.545567332	415.195709	193.1387	02:19	
0.597173823	454.461182	193.0746	02:20	
0.648719658	493.683777	192.9912	02:22	
0.700271712	532.910339	192.9137	02:23	
0.751766975	572.087341	192.8432	02:24	
0.803236765	611.249390	192.8041	02:26	
0.854783105	650.462585	192.7953	02:27	
0.887702963	675.506958	192.8021	02:29	
0.939358721	714.807983	192.8735	02:30	
0.989858970	753.221619	193.0280	02:31	
0.921930971	701.518921	193.8724	02:33	
0.869400139	661.540527	193.2791	02:35	
0.817567856	622.088379	193.1451	02:36	
0.765704834	582.614380	193.1301	02:38	
0.714041793	543.299377	193.1590	02:40	
0.661863185	503.587952	193.2276	02:41	
0.610692269	464.644775	193.3238	02:43	
0.558509370	424.933167	193.4274	02:45	
0.506850097	385.621490	193.5431	02:47	
0.455501493	346.551086	193.6503	02:49	
0.422660264	321.558807	193.5577	02:50	
0.351999493	267.797668	193.5652	02:52	
0.300562519	228.660477	193.6375	02:53	
0.268208571	204.042419	193.6001	02:55	
0.216647409	164.813522	193.5328	02:57	
0.165248111	125.709290	193.4017	02:59	
		193.1053	03:01	
			03:04	760.708313
0.113451959	86.303848	192.4940	03:06	
0.063950035	48.647324	191.4387	03:10	
0.010211370	7.767874	186.9092	03:21	

## 2. ZX-Kapas

ASAP 2020 V4.02 (V4.02 E)

Unit 1

Serial #: 2041

Page 3

Sample: ZX-Kapas 4M-24  
Operator: Lab Kimia  
Submitter: UNJ  
File: C:\2020\DATA\000-005.SMP

Started: 5/15/2016 7:56:47AM  
Completed: 5/15/2016 4:43:00PM  
Report Time: 5/24/2016 9:50:32AM  
Sample Mass: 0.2600 g  
Cold Free Space: 84.3304 cm<sup>3</sup>  
Ambient Temperature: 22.00 °C  
Automatic Degas: Yes

Analysis Adsorptive: N2  
Analysis Bath Temp.: -195.789 °C  
Thermal Correction: No  
Warm Free Space: 27.3752 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration Interval: 5 s  
Low Pressure Dose: None

Isotherm Tabular Report				
Relative Pressure (P/Po)	Absolute Pressure (mmHg)	Quantity Adsorbed (cm <sup>3</sup> /g STP)	Elapsed Time (h:min)	Saturation Pressure (mmHg)
			01:00	761.022522
0.010016242	7.620782	166.9857	01:59	
0.059966240	45.624130	171.7585	02:03	
0.132467213	100.783447	173.4556	02:07	
0.174137814	132.486130	173.9698	02:09	
0.221013313	168.148895	174.3694	02:10	
0.269312045	204.893356	174.6555	02:12	
0.320654013	243.953491	174.8692	02:13	
0.371409973	282.566345	175.0286	02:15	
0.422973422	321.792908	175.1399	02:17	
0.474534311	361.018341	175.2202	02:18	
0.526162121	400.294373	175.2869	02:19	
0.577643521	439.456940	175.3651	02:21	
0.629305540	478.758209	175.4547	02:22	
0.680800501	517.929993	175.6167	02:24	
0.732639899	557.365417	175.8279	02:25	
0.784204223	596.588867	176.0488	02:27	
0.835722778	635.779419	176.2450	02:28	
0.887349736	675.052124	176.4392	02:29	
0.938675998	714.092896	176.7433	02:31	
0.989369217	752.654480	177.7232	02:32	
0.921944452	701.356018	176.9865	02:34	
0.869156925	661.193359	176.7335	02:36	
0.817312092	621.748474	176.5903	02:38	
0.765636740	582.435486	176.4739	02:39	
0.732739960	557.405762	176.3795	02:41	
0.680883124	517.953369	176.2546	02:43	
0.629384430	478.775970	176.1751	02:44	
0.577380513	439.212799	176.1301	02:46	
0.525843755	400.007233	176.0980	02:47	
0.474589676	361.015564	175.9101	02:49	
0.422548410	321.425720	175.6558	02:51	
0.370627267	281.927887	175.5723	02:53	
0.300595578	228.654510	175.4360	02:55	
0.268068382	203.911179	175.3171	02:56	
0.216553944	164.723785	175.0741	02:59	
			03:01	760.653259
0.165094425	125.579613	174.6794	03:04	
0.113420180	86.273430	174.0357	03:06	
0.064292752	48.904491	172.8894	03:10	
0.009157222	6.965471	167.8684	03:24	

### 3. ZX-Kapuk

ASAP 2020 V4.02 (V4.02 E)

Unit 1

Serial #: 2041

Page 3

Sample: ZX-Kapul 4M-24  
Operator: Lab Kimia  
Submitter: UNJ  
File: C:\2020\DATA\000-003.SMP

Started: 5/12/2016 5:42:54PM  
Completed: 5/13/2016 7:20:03AM  
Report Time: 5/24/2016 9:57:53AM  
Sample Mass: 0.2300 g  
Cold Free Space: 84.2498 cm<sup>3</sup>  
Ambient Temperature: 22.00 °C  
Automatic Degas: Yes

Analysis Adsorptive: N2  
Analysis Bath Temp.: -195.816 °C  
Thermal Correction: No  
Warm Free Space: 27.3364 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration Interval: 5 s  
Low Pressure Dose: None

#### Isotherm Tabular Report

Relative Pressure (P/Po)	Absolute Pressure (mmHg)	Quantity Adsorbed (cm <sup>3</sup> /g STP)	Elapsed Time (h:min)	Saturation Pressure (mmHg)
0.010978624	8.326925	77.0251	13:56	758.643066
0.062847907	47.654804	81.0733	14:46	
0.121739313	92.307426	81.3479	15:46	758.213806
0.169978004	128.882660	81.4480	15:51	
0.216903378	164.462189	81.5122	15:53	758.213806
0.268485000	203.570923	81.5560	15:54	
			15:56	758.213806
			15:58	
0.319147741	241.982224	81.7921	15:59	758.213806
0.372042552	282.087799	81.8508	16:01	
0.442063340	335.178528	81.8629	16:03	758.213806
0.493479291	374.162811	81.9065	16:04	
0.525914233	398.755432	82.0156	16:06	758.213806
0.577624446	437.962830	82.1103	16:07	
0.628996484	476.913818	82.1837	16:09	758.213806
0.680588203	516.031372	82.2860	16:10	
0.732314597	555.251038	82.4207	16:11	758.213806
0.783790317	594.280640	82.6045	16:13	
0.835603327	633.565979	82.7623	16:14	758.213806
0.886841657	672.415588	82.9732	16:16	
0.938616269	711.671814	83.2277	16:17	758.213806
0.989526085	750.272339	83.8488	16:19	
0.919562490	697.224976	83.9749	16:20	758.213806
0.867664071	657.874878	84.2872	16:22	
0.815978169	618.685913	84.6737	16:24	758.213806
0.764413658	579.588989	84.9975	16:25	
0.712798514	540.453674	85.3132	16:27	758.213806
0.661026357	501.199310	85.6615	16:28	
0.609497387	462.129333	85.9649	16:30	758.213806
0.557537870	422.732910	86.2762	16:31	
0.505842348	383.536652	86.5833	16:33	758.213806
0.454362843	344.504181	86.8341	16:34	
0.402634156	305.282776	87.1623	16:36	758.213806
0.350998686	266.132050	87.5070	16:38	
0.299372594	226.988434	87.8485	16:40	758.213806
0.247931850	187.985352	88.1183	16:41	
0.196203706	148.764359	88.4330	16:44	758.213806
0.144835411	109.816208	88.6531	16:45	
0.106749808	80.939178	88.7869	16:47	758.213806
0.057981251	43.962185	88.9230	16:49	
0.010257768	7.777581	88.8570	16:57	758.213806

## 4. ZX-Nanas

ASAP 2020 V4.02 (V4.02 E)

Unit 1

Serial #: 2041

Page 3

Sample: ZX-Nanas 4M-24  
Operator: Lab Kimia  
Submitter: UNJ  
File: C:\2020\DATA\000-011.SMP

Started: 5/16/2016 7:41:48AM  
Completed: 5/16/2016 11:51:15AM  
Report Time: 5/24/2016 9:56:46AM  
Sample Mass: 0.2800 g  
Cold Free Space: 84.7487 cm<sup>3</sup>  
Ambient Temperature: 22.00 °C  
Automatic Degas: Yes

Analysis Adsorptive: N2  
Analysis Bath Temp.: -195.782 °C  
Thermal Correction: No  
Warm Free Space: 27.3877 cm<sup>3</sup> Measured  
Equilibration Interval: 5 s  
Low Pressure Dose: None

Isotherm Tabular Report				
Relative Pressure (P/Po)	Absolute Pressure (mmHg)	Quantity Adsorbed (cm <sup>3</sup> /g STP)	Elapsed Time (h:min)	Saturation Pressure (mmHg)
0.010004237	7.617379	158.9685	01:00	761.376770
0.060624116	46.160358	163.1514	02:01	
0.133217304	101.434448	164.4365	02:07	
0.174182750	132.626617	164.7746	02:10	
0.220230318	167.688538	164.9907	02:12	
0.268548484	204.479294	165.1156	02:14	
0.320338338	243.913742	165.1567	02:15	
0.390539470	297.366913	165.1167	02:17	
0.442046192	336.586029	165.0733	02:18	
0.493746046	375.952332	165.0733	02:20	
0.545151677	415.094391	164.9705	02:22	
0.596884658	454.486145	164.8516	02:23	
0.648420133	493.727234	164.7001	02:25	
0.699896125	532.923096	164.5334	02:26	
0.751506877	572.222107	164.3592	02:27	
0.802940894	611.386169	164.1829	02:29	
0.854275763	650.475342	164.0415	02:30	
0.905636702	689.583923	163.9232	02:32	
0.956631155	728.413513	163.8890	02:33	
0.989368024	753.341797	164.0467	02:34	
0.920627125	701.000488	164.5977	02:36	761.453796
0.868400027	661.233887	164.2691	02:37	
0.816474654	621.696899	164.2360	02:39	
0.764733728	582.299744	164.3214	02:41	
0.713042154	542.940552	164.4609	02:42	
0.660934255	503.264221	164.6165	02:44	
0.609276355	463.930023	164.7832	02:46	
0.557721400	424.674500	164.9640	02:47	
0.506089224	385.360046	165.1270	02:49	
0.454736903	346.258270	165.2927	02:51	
0.403116089	306.952240	165.3338	02:52	
0.351514162	267.660461	165.4366	02:54	
0.300047249	228.471359	165.5207	02:56	
0.248534818	189.247467	165.5510	02:58	
0.216469126	164.831238	165.5331	03:00	
0.164885618	125.552780	165.5331	03:02	
0.113382437	86.335487	165.4309	03:04	
0.064021723	48.749584	165.2366	03:07	
0.009067038	6.904130	164.8013	03:10	
		163.8935	03:14	
		159.4880	03:27	

## LAMPIRAN F : PERHITUNGAN KAPASITAS ADSORPSI CO<sub>2</sub>

### 1. Cara Perhitungan Kapasitas Adsorpsi Karbon Dioksida Secara Gravimetri

- Kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> (% berat) :

$$\% \text{ Berat CO}_2 = \frac{\Delta m}{m'_0} \times 100\%$$

Keterangan :

$m_0$  = massa sampel + holder pada menit ke-0

$m_t$  = massa sampel + holder pada menit ke-t

$m'_0$  = massa adsorben

$$\Delta m = m_t - m_0$$

Contoh :

$$m_0 = 15,862 \text{ g}$$

$$m_{t1} = 15,897 \text{ g}$$

$$\Delta m = m_{t5} - m_0 = 15,897 - 15,862 = 0,035 \text{ g}$$

$$\% \text{ Berat CO}_2 (t=5 \text{ menit}) = \frac{0,035}{0,846} \times 100\% = 4,137 \%$$

Untuk selanjutnya, perhitungan dilakukan hingga  $m_t$  mencapai setimbang.

Hasil dapat dilihat perhitungan no. 2-4

### 2. Kapasitas Adsorpsi CO<sub>2</sub> pada Zeolit-X Suhu 30 °C

$$\text{Aliran gas CO}_2 = 20 \text{ mL/menit}$$

$$\text{Massa holder} = 15,016 \text{ gram}$$

$$\text{Massa sampel} = 0,846 \text{ gram}$$

$$\text{Tekanan luar} = 1 \text{ bar}$$

$$\text{Tekanan kesetimbangan} = 0,75 \text{ bar}$$

Tabel F.1 Hasil perhitungan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> pada zeolit-X Suhu 30 °C

t (min)	Δm (g)	% berat	t (min)	Δm (g)	% berat
0	0.000000	0.000	15	0.160000	18.913
1	0.035000	4.137	16	0.169000	19.976
2	0.048000	5.674	17	0.175000	20.686
3	0.055000	6.501	18	0.178000	21.040
4	0.063000	7.447	19	0.178000	21.040
5	0.068000	8.038	20	0.179000	21.158
6	0.084000	9.929	21	0.180000	21.277
7	0.089000	10.520	22	0.180000	21.277
8	0.094000	11.111	23	0.181000	21.395
9	0.099000	11.702	24	0.182000	21.513
10	0.112000	13.239	25	0.182000	21.513
11	0.110000	13.002	26	0.182000	21.513
12	0.126000	14.894	27	0.182000	21.513
13	0.133000	15.721	28	0.182000	21.513
14	0.145000	17.139			

### 3. Kapasitas Adsorpsi CO<sub>2</sub> pada ZX-Kapas Suhu 30 °C

Tabel F.2 Hasil perhitungan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> pada ZX-Kapas Suhu 30 °C

t (min)	Δm (g)	% berat	t (min)	Δm (g)	% berat
0	0.000	0.000	15	0.074	11.350
1	0.018	2.761	16	0.075	11.503
2	0.025	3.834	17	0.078	11.963
3	0.031	4.755	18	0.079	12.117
4	0.039	5.982	19	0.080	12.270
5	0.045	6.902	20	0.080	12.270
6	0.049	7.515	21	0.081	12.423
7	0.048	7.362	22	0.082	12.577
8	0.053	8.129	23	0.081	12.423
9	0.06	9.202	24	0.082	12.577
10	0.059	9.049	25	0.083	12.730
11	0.066	10.123	26	0.084	12.883
12	0.065	9.969	27	0.084	12.883
13	0.071	10.890	28	0.084	12.883
14	0.072	11.043	29	0.084	12.883
15	0.074	11.350	30	0.084	12.883
16	0.075	11.503	31	0.084	12.883



#### 4. Kapasitas Adsorpsi CO<sub>2</sub> pada ZX-Kapuk Suhu 30 °C

Aliran gas CO<sub>2</sub> = 20 mL/menit

Massa holder = 15,016 gram

Massa sampel = 0,6690 gram

Tekanan luar = 1 bar

Tekanan kesetimbangan = 0,75 bar

Tabel F.3 Hasil perhitungan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> pada ZX-Kapuk Suhu 30 °C

t (min)	Δm (g)	% berat	t (min)	Δm (g)	% berat
0	0.000	0.000	17	0.091	13.602
1	0.02	2.990	18	0.092	13.752
2	0.027	4.036	19	0.091	13.602
3	0.039	5.830	20	0.094	14.051
4	0.044	6.577	21	0.096	14.350
5	0.052	7.773	22	0.095	14.200
6	0.057	8.520	23	0.096	14.350
7	0.064	9.567	24	0.098	14.649
8	0.071	10.613	25	0.099	14.798
9	0.069	10.314	26	0.100	14.948
10	0.076	11.360	27	0.100	14.948
11	0.083	12.407	28	0.101	15.097
12	0.083	12.407	29	0.101	15.097
13	0.085	12.706	30	0.101	15.097
14	0.088	13.154	31	0.101	15.097
15	0.087	13.004	32	0.101	15.097
16	0.090	13.453			

## 5. Kapasitas Adsorpsi CO<sub>2</sub> pada ZX-Nanas Suhu 30 °C

Aliran gas CO<sub>2</sub> = 20 mL/menit

Massa holder = 15,016 gram

Massa sampel = 0,643 gram

Tekanan luar = 1 bar

Tekanan kesetimbangan = 0,75 bar

Tabel F.4 Hasil perhitungan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> pada ZX-Nanas suhu 30 °C

t (min)	Δm (g)	% berat	t (min)	Δm (g)	% berat
0	0.000	0.000	15	0.099	15.397
1	0.031	4.821	16	0.116	18.040
2	0.047	7.309	17	0.102	15.863
3	0.053	8.243	18	0.117	18.196
4	0.069	10.731	19	0.109	16.952
5	0.077	11.975	20	0.114	17.729
6	0.086	13.375	21	0.119	18.507
7	0.08	12.442	22	0.120	18.663
8	0.097	15.086	23	0.121	18.818
9	0.081	12.597	24	0.118	18.351
10	0.102	15.863	25	0.122	18.974
11	0.109	16.952	26	0.122	18.974
12	0.105	16.330	27	0.122	18.974
13	0.100	15.552	28	0.122	18.974
14	0.111	17.263	29	0.122	18.974
15	0.099	15.397			

## 6. Kapasitas Adsorpsi CO<sub>2</sub> pada ZX-Nanas Suhu 40 °C

Aliran gas CO<sub>2</sub> = 20 mL/menit  
 Massa holder = 14,977 gram  
 Massa sampel = 0,682 gram  
 Tekanan luar = 1 bar  
 Tekanan kesetimbangan = 0,80 bar

Tabel F.5 Hasil perhitungan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> pada ZX-Nanas suhu 40 °C

t (min)	Δm (g)	% berat	t (min)	Δm (g)	% berat
0	0.000	0.000	16	0.083	12.170
1	0.020	2.933	17	0.079	11.584
2	0.029	4.252	18	0.082	12.023
3	0.037	5.425	19	0.075	10.997
4	0.041	6.012	20	0.089	13.050
5	0.049	7.185	21	0.088	12.903
6	0.044	6.452	22	0.087	12.757
7	0.058	8.504	23	0.091	13.343
8	0.065	9.531	24	0.092	13.490
9	0.06	8.798	25	0.092	13.490
10	0.07	10.264	26	0.092	13.490
11	0.068	9.971	27	0.092	13.490
12	0.073	10.704	28	0.092	13.490
13	0.065	9.531			
14	0.078	11.437			
15	0.067	9.824			

## 7. Kapasitas Adsorpsi CO<sub>2</sub> pada ZX-Nanas Suhu 50 °C

Aliran gas CO<sub>2</sub> = 20 mL/menit

Massa holder = 14,977 gram

Massa sampel = 0,663 gram

Tekanan luar = 1 bar

Tekanan kesetimbangan = 0,85 bar

Tabel F.6 Hasil perhitungan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> pada ZX-Nanas suhu 50°C

t (min)	Δm (g)	% berat	t (min)	Δm (g)	% berat
0	0.000	0.000	13	0.061	9.201
1	0.010	1.508	14	0.062	9.351
2	0.015	2.262	15	0.065	9.804
3	0.02	3.017	16	0.067	10.106
4	0.025	3.771	17	0.067	10.106
5	0.031	4.676	18	0.068	10.256
6	0.035	5.279	19	0.069	10.407
7	0.048	7.240	20	0.069	10.407
8	0.052	7.843	21	0.069	10.407
9	0.054	8.145	22	0.069	10.407
10	0.053	7.994	23	0.069	10.407
11	0.058	8.748			
12	0.059	8.899			

## LAMPIRAN G : PERHITUNGAN KAPASITAS DESORPSI CO<sub>2</sub>

### 1. Cara Perhitungan Kapasitas Desorpsi Karbon Dioksida Secara Gravimetri

- Kapasitas desorpsi CO<sub>2</sub> (% berat) :

$$\% \text{ Berat CO}_2 = \frac{\Delta m}{m'_0} \times 100\%$$

Keterangan :

$m_0$  = massa sampel + holder pada saat setimbang

$m_t$  = massa sampel + holder pada menit ke-t

$m'_0$  = massa adsorben

$$\Delta m = m_0 - m_t$$

Contoh :

$$m_0 = 16,044 \text{ g}$$

$$m_{t1} = 16,024 \text{ g}$$

$$\Delta m = m_{t5} - m_0 = 16,044 - 16,034 = 0,01 \text{ g}$$

$$\% \text{ Berat CO}_2 \text{ terdesorp (t=1 menit)} = \frac{0,01}{0,846} \times 100\% = 1,182\%$$

Untuk selanjutnya, perhitungan dilakukan hingga  $m_t$  mencapai setimbang.

Hasil dapat dilihat perhitungan no. 2-4

### 2. Kapasitas Desorpsi CO<sub>2</sub> pada Zeolit-X Suhu 30 °C

Tabel G.1 Hasil perhitungan kapasitas desorpsi CO<sub>2</sub> pada Zeolit-X Suhu 30 °C

menit	massa hilang	% terdesorp
0	0	0
1	0.01	1.182033097
2	0.02	2.364066194
3	0.03	3.546099291
4	0.04	4.728132388
5	0.05	5.910165485
6	0.06	7.092198582
7	0.06	7.092198582
8	0.07	8.274231678
9	0.07	8.274231678
10	0.08	9.456264775

11	0.09	10.63829787
12	0.09	10.63829787
13	0.09	10.63829787
14	0.09	10.63829787
15	0.09	10.63829787

### 3. Kapasitas Desorpsi CO<sub>2</sub> pada pada ZX-Kapas

Tabel G.2 Hasil perhitungan kapasitas desorpsi CO<sub>2</sub> pada pada ZX-Kapas

menit	massa hilang	% terdesorp
0	0.000	0
1	0.022	3.374233129
2	0.025	3.834355828
3	0.030	4.601226994
4	0.033	5.061349693
5	0.036	5.521472393
6	0.039	5.981595092
7	0.047	7.208588957
8	0.050	7.668711656
9	0.053	8.128834356
10	0.055	8.435582822
11	0.062	9.509202454
12	0.062	9.509202454
13	0.066	10.12269939
14	0.067	10.27607362
15	0.068	10.42944785
16	0.068	10.42944785
17	0.069	10.58282209
18	0.069	10.58282209
19	0.070	10.73619632
20	0.070	10.73619632
21	0.070	10.73619632
22	0.070	10.73619632
23	0.070	10.73619632

#### 4. Kapasitas Desorpsi CO<sub>2</sub> pada ZX-Kapuk

Tabel G.3 Hasil perhitungan kapasitas desorpsi CO<sub>2</sub> pada ZX-Kapuk

menit	massa hilang	% terdesorp
0	0.000	0
1	0.015	2.242152466
2	0.021	3.139013453
3	0.025	3.736920777
4	0.039	5.829596413
5	0.043	6.427503737
6	0.050	7.473841555
7	0.051	7.623318386
8	0.054	8.071748879
9	0.057	8.520179372
10	0.059	8.819133034
11	0.061	9.118086697
12	0.063	9.417040359
13	0.064	9.56651719
14	0.067	10.01494768
15	0.068	10.16442451
16	0.070	10.46337818
17	0.070	10.46337818
18	0.075	11.21076233
19	0.078	11.65919283
20	0.082	12.25710015
21	0.085	12.70553064
22	0.086	12.85500747
23	0.086	12.85500747
24	0.086	12.85500747
25	0.086	12.85500747
26	0.086	12.85500747

## 5. Kapasitas Desorpsi CO<sub>2</sub> pada ZX-Nanas

Tabel G.4 Hasil perhitungan kapasitas desorpsi CO<sub>2</sub> pada ZX-Nanas

menit	massa hilang	% terdesorp
0	0.000	0
1	0.019	2.954899
2	0.035	5.443235
3	0.043	6.687403
4	0.049	7.620529
5	0.056	8.709176
6	0.059	9.175739
7	0.059	9.175739
8	0.064	9.953344
9	0.066	10.26439
10	0.067	10.41991
11	0.068	10.57543
12	0.068	10.57543
13	0.070	10.88647
14	0.073	11.35303
15	0.073	11.35303
16	0.075	11.66407
17	0.077	11.97512
18	0.080	12.44168
19	0.086	13.37481
20	0.102	15.86314
21	0.105	16.3297
22	0.106	16.48523
23	0.107	16.64075
24	0.107	16.64075
25	0.107	16.64075
26	0.107	16.64075
27	0.107	16.64075



## LAMPIRAN H : ANALISA DATA MODEL KINETIKA ADSORPSI

### 1. Model orde satu semu

Model orde satu semu dapat ditentukan dengan melakukan plot linear antara  $\ln(q_e - q_t)$  sebagai sumbu y dan t sebagai sumbu x dari bentuk persamaan berikut.

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$$

Keterangan :

$q_e$  : kapasitas adsorpsi pada saat kesetimbangan (mmol/g)

$q_t$  : kapasitas adsorpsi saat waktu ke-t (mmol/g)

t : waktu adsorpsi (menit)

$k_1$  : konstanta orde satu semu ( $\text{menit}^{-1}$ )

Tabel H.1a Hasil perhitungan orde satu semu pada suhu 30 °C

t	qe (mmol/g)	qt (mmol/g)	(qe-qt)	ln (qe-qt)
x		0		y
0	4.312173	0.000000	4.312173	1.461442
1	4.312173	1.095716	3.216457	1.168280
2	4.312173	1.661247	2.650926	0.974909
3	4.312173	1.873321	2.438852	0.891527
4	4.312173	2.438852	1.873321	0.627713
5	4.312173	2.721617	1.590556	0.464083
6	4.312173	3.039729	1.272445	0.240940
7	4.312173	2.827654	1.484519	0.395091
8	4.312173	3.428531	0.883642	-0.123703
9	4.312173	2.863000	1.449173	0.370993
10	4.312173	3.605259	0.706914	-0.346847
11	4.312173	3.852679	0.459494	-0.777630
12	4.312173	3.711296	0.600877	-0.509366
13	4.312173	3.534568	0.777605	-0.251537
14	4.312173	3.923371	0.388802	-0.944684
15	4.312173	3.499222	0.812951	-0.207085
16	4.312173	4.100099	0.212074	-1.550820
17	4.312173	3.605259	0.706914	-0.346847
18	4.312173	4.135445	0.176728	-1.733141
19	4.312173	3.852679	0.459494	-0.777630
20	4.312173	4.029408	0.282765	-1.263138
21	4.312173	4.206136	0.106037	-2.243967
22	4.312173	4.241482	0.070691	-2.649432
23	4.312173	4.276827	0.035346	-3.342579
24	4.312173	4.170790	0.141383	-1.956285

25	4.312173	4.312173	0.000000	#NUM!
26	4.312173	4.312173	0.000000	#NUM!
27	4.312173	4.312173	0.000000	#NUM!
28	4.312173	4.312173	0.000000	#NUM!
29	4.312173	4.312173	0.000000	#NUM!

Tabel H.1b Hasil perhitungan orde satu semu pada suhu 40 °C

<b>t</b>	<b>qe (mmol/g)</b>	<b>qt (mmol/g)</b>	<b>(qe-qt)</b>	<b>ln (qe-qt)</b>
<b>x</b>		<b>0</b>		<b>y</b>
0	3.065849	0.000000	3.065849	1.120325
1	3.065849	0.666489	2.399360	0.875202
2	3.065849	0.966409	2.099440	0.741671
3	3.065849	1.233005	1.832845	0.605869
4	3.065849	1.366302	1.699547	0.530362
5	3.065849	1.632898	1.432951	0.359736
6	3.065849	1.466276	1.599573	0.469737
7	3.065849	1.932818	1.133031	0.124897
8	3.065849	2.166089	0.899760	-0.105627
9	3.065849	1.999467	1.066382	0.064272
10	3.065849	2.332711	0.733138	-0.310422
11	3.065849	2.266062	0.799787	-0.223410
12	3.065849	2.432685	0.633164	-0.457025
13	3.065849	2.166089	0.899760	-0.105627
14	3.065849	2.599307	0.466542	-0.762407
15	3.065849	2.232738	0.833111	-0.182588
16	3.065849	2.765929	0.299920	-1.204239
17	3.065849	2.632631	0.433218	-0.836515
18	3.065849	2.732605	0.333244	-1.098879
19	3.065849	2.499334	0.566516	-0.568251
20	3.065849	2.965876	0.099973	-2.302852
21	3.065849	2.932551	0.133298	-2.015170
22	3.065849	2.899227	0.166622	-1.792026
23	3.065849	3.032525	0.033324	-3.401464
24	3.065849	3.065849	0.000000	#NUM!
25	3.065849	3.065849	0.000000	#NUM!
26	3.065849	3.065849	0.000000	#NUM!
27	3.065849	3.065849	0.000000	#NUM!
28	3.065849	3.065849	0.000000	#NUM!

Tabel H.1c Hasil perhitungan orde satu semu pada suhu 50 °C

t	q <sub>e</sub> (mmol/g)	q <sub>t</sub> (mmol/g)	(q <sub>e</sub> -q <sub>t</sub> )	ln (q <sub>e</sub> -q <sub>t</sub> )
x		0		y
0	2.365282	0.000000	2.365282	0.860897
1	2.365282	0.342794	2.022487	0.704328
2	2.365282	0.514192	1.851090	0.615775
3	2.365282	0.685589	1.679693	0.518611
4	2.365282	0.856986	1.508296	0.410980
5	2.365282	1.062663	1.302619	0.264377
6	2.365282	1.199781	1.165501	0.153151
7	2.365282	1.645413	0.719868	-0.328687
8	2.365282	1.782531	0.582751	-0.539996
9	2.365282	1.851090	0.514192	-0.665159
10	2.365282	1.816811	0.548471	-0.600621
11	2.365282	1.988208	0.377074	-0.975314
12	2.365282	2.022487	0.342794	-1.070624
13	2.365282	2.091046	0.274236	-1.293768
14	2.365282	2.125326	0.239956	-1.427299
15	2.365282	2.228164	0.137118	-1.986915
16	2.365282	2.296723	0.068559	-2.680062
17	2.365282	2.296723	0.068559	-2.680062
18	2.365282	2.331002	0.034279	-3.373209
19	2.365282	2.365282	0.000000	#NUM!
20	2.365282	2.365282	0.000000	#NUM!
21	2.365282	2.365282	0.000000	#NUM!
22	2.365282	2.365282	0.000000	#NUM!
23	2.365282	2.365282	0.000000	#NUM!

Nilai  $k_1$  pada masing-masing suhu dapat dihitung sebagai berikut.

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$$

$$y = a - bx$$

Pada suhu 30 °C

Persamaan yang diperoleh sebagai berikut berikut.

$$y = 0,6922 - 0,0763x$$

$$R^2 = 0,3225$$

Sehingga diperoleh,

$$b = k_f = 0,0763 \text{ menit}^{-1}$$

$$\ln q_e = 0,6922$$

$$q_e = 1,9981 \text{ mmol/g}$$

Pada suhu 40 °C

$$y = 0,5889 - 0,0678x$$

$$R^2 = 0,3017$$

Sehingga diperoleh,

$$b = k_f = 0,0678 \text{ menit}^{-1}$$

$$\ln q_e = 0,5889$$

$$q_e = 1,8020 \text{ mmol/g}$$

Pada suhu 50 °C.

$$y = 0,29778 - 0,0770x$$

$$R^2 = 0,1874$$

Sehingga diperoleh,

$$b = k_f = 0,0770 \text{ menit}^{-1}$$

$$\ln q_e = 0,2977$$

$$q_e = 1,3467 \text{ mmol/g}$$

Tabel H.1d Parameter adsorpsi kinetik orde satu semu gas CO<sub>2</sub> pada ZX-Nanas 24J

Suhu	Orde satu semu		
	$K_f(\text{menit}^{-1})$	$q_e(\text{mmol/g})$	$R^2$
30 °C	0,0763	1,9981	0,3225
40 °C	0,0678	1,8020	0,3017
50 °C	0,0770	1,3467	0,1874

## 2. Model orde dua semu

Model kinetik orde dua semu dapat ditentukan dengan melakukan plot linear antara  $t$  sebagai sumbu x dan  $t/q_t$  sebagai sumbu y dari persamaan berikut.

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_s q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$$

Keterangan :

$q_e$  : kapasitas adsorpsi pada saat kesetimbangan (mmol/g)

$q_t$  : kapasitas adsorpsi saat waktu ke-t (mmol/g)

$t$  : waktu adsorpsi (menit)

$k_s$  : konstanta orde dua semu (g/mmol menit)

Tabel H.2a Hasil perhitungan orde dua semu pada suhu 30 °C

t	qt (mmol/g)	t/qt	t	qt (mmol/g)	t/qt
x		y	x		y
0	0.000000	#DIV/0!	15	3.499222	4.28666667
1	1.095716	0.91264516	16	4.100099	3.90234483
2	1.661247	1.20391489	17	3.605259	4.71533333
3	1.873321	1.60143396	18	4.135445	4.35261538
4	2.438852	1.64011594	19	3.852679	4.93163303
5	2.721617	1.83714286	20	4.029408	4.96350877
6	3.039729	1.97386047	21	4.206136	4.99270588
7	2.827654	2.47555	22	4.241482	5.18686667
8	3.428531	2.33336082	23	4.276827	5.37781818
9	2.863000	3.14355556	24	4.170790	5.75430508
10	3.605259	2.77372549	25	4.312173	5.79754098
11	3.852679	2.85515596	26	4.312173052	6.02944262
12	3.711296	3.23337143	27	4.312173052	6.26134426
13	3.534568	3.67796	28	4.312173052	6.4932459
14	3.923371	3.56836036	29	4.312173052	6.72514754

Tabel H.2b Hasil perhitungan orde dua semu pada suhu 40 °C

t	qt (mmol/g)	t/qt	t	qt (mmol/g)	t/qt
x		y	x		y
0	0	#DIV/0!	15	2.232737937	6.71820896
1	0.666488936	1.5004	16	2.765929086	5.7846747
2	0.966408958	2.06951724	17	2.632631298	6.45741772
3	1.233004532	2.43308108	18	2.732604639	6.58712195
4	1.366302319	2.92760976	19	2.499333511	7.60202667
5	1.632897894	3.06204082	20	2.965875766	6.74337079
6	1.46627566	4.092	21	2.93255132	7.161
7	1.932817915	3.62165517	22	2.899226873	7.58822989
8	2.166089043	3.69329231	23	3.03252466	7.58443956
9	1.999466809	4.5012	24	3.065849107	7.82817391
10	2.332711277	4.28685714	25	3.065849107	8.15434783
11	2.266062383	4.85423529	26	3.065849107	8.48052174
12	2.432684617	4.93282192	27	3.065849107	8.80669565
13	2.166089043	6.0016	28	3.065849107	9.13286957
14	2.599306852	5.38605128			

Tabel H.2c Hasil perhitungan orde dua semu pada suhu 50 °C

t	qt (mmol/g)	t/qt	t	qt (mmol/g)	t/qt
x		y	x		y
0	0.000000	#DIV/0!	13	2.091046	6.21698361
1	0.342794	2.9172	14	2.125326	6.58722581
2	0.514192	3.8896	15	2.228164	6.732
3	0.685589	4.3758	16	2.296723	6.96644776
4	0.856986	4.66752	17	2.296723	7.40185075
5	1.062663	4.70516129	18	2.331002	7.722
6	1.199781	5.00091429	19	2.365282	8.03286957
7	1.645413	4.25425	20	2.365282	8.45565217
8	1.782531	4.488	21	2.365282	8.87843478
9	1.851090	4.862	22	2.365282	9.30121739
10	1.816811	5.50415094	23	2.365282	9.724
11	1.988208	5.53262069			
12	2.022487	5.93328814			

Nilai  $k_s$  masing-masing suhu dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_s q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$$

$$y = a + bx$$

Pada suhu 30 °C

$$y = 0,7745 + 0,2063x$$

$$R^2 = 0,9825$$

$$b = \frac{1}{q_e} = 0,2063$$

$$q_e = \frac{1}{0,2063} = 4,8473 \text{ mmol/g}$$

$$a = \frac{1}{k_s q_e^2} = 0,7745$$

$$\frac{1}{k_s (4,8473)^2} = 0,7745$$

$$k_s = 0,0550 \text{ g/mmol menit}$$

Pada suhu 40 °C

$$y = 1,6177 + 0,2735x$$

$$R^2 = 0,9557$$

Sehingga diperoleh,

$$b = \frac{1}{q_e} = 0,2735$$

$$q_e = \frac{1}{0,2735} = 3,6563 \text{ mmol/g}$$

$$a = \frac{1}{k_s q_e^2} = 1,6177$$

$$\frac{1}{k_s (3,6563)^2} = 1,6177$$

$$k_s = 0,0462 \text{ g/mmol menit}$$

Pada suhu 50 °C

$$y = 2,4766 + 0,2996x$$

$$R^2 = 0,9016$$

$$b = \frac{1}{q_e} = 0,2996$$

$$q_e = \frac{1}{0,2996} = 3,3378 \text{ mmol/g}$$

$$a = \frac{1}{k_s q_e^2} = 2,4766$$

$$\frac{1}{k_s (3,3378)^2} = 2,4766$$

$$k_s = 0,0362 \text{ g/mmol menit}$$

Laju penyerapan awal yang disimbolkan dengan h, dapat diperoleh menggunakan persamaan berikut.

$$h = k_s q_e^2$$

Sehingga diperoleh hasil sebagai berikut/

Pada suhu 30 °C

$$h = k_s q_e^2$$

$$h = 0,0550 \times (4,8473)^2$$

$$h = 1,2923 \text{ mmol/g menit}$$

Pada suhu 40 °C

$$h = k_s q_e^2$$

$$h = 0,0462 \times (3,6563)^2$$

$$h = 0,6176 \text{ mmol/g menit}$$

Pada suhu 50 °C

$$h = k_s q_e^2$$

$$h = 0,0362 \times (3,3378)^2$$

$$h = 0,4033 \text{ mmol/g menit}$$

Tabel H.2d Parameter adsorpsi kinetik orde dua semu gas CO<sub>2</sub> pada ZX-Nanas 24J

Suhu	Orde dua semu			
	$k_s$ (g/mmol menit)	$h$ (mmol/g menit)	$q_e$ (mmol/g)	$R^2$
30 °C	0,0550	1,2923	4,8473	0,9825
40 °C	0,0462	0,6176	3,6563	0,9557
50 °C	0,0362	0,4033	3,3378	0,9016

### 3. Model difusi intra partikel

Model difusi intra partikel dapat ditentukan dengan melakukan plot linear antara  $t^{1/2}$  sebagai sumbu x dan  $q_t$  sebagai sumbu y menggunakan persamaan berikut :

$$q_t = k_{id} t^{1/2} + C$$

Keterangan :

$q_t$  : kapasitas adsorpsi pada menit ke-t (mmol/g)

$C$  : ketebalan batas lapisan

$t$  : waktu adsorpsi (menit)

$k_{id}$  : konstanta (mmol/g menit<sup>0,5</sup>)

Tabel H.3a Hasil perhitungan model difusi intra partikel pada suhu 30 °C

$t$	$q_t$ (mmol/g)	$t^{0,5}$	$t$	$q_t$ (mmol/g)	$t^{0,5}$
	Y	x		y	x
0	0.000000	0.000	15	3.499222	3.873
1	1.095716	1.000	16	4.100099	4.000
2	1.661247	1.414	17	3.605259	4.123
3	1.873321	1.732	18	4.135445	4.243
4	2.438852	2.000	19	3.852679	4.359
5	2.721617	2.236	20	4.029408	4.472
6	3.039729	2.449	21	4.206136	4.583
7	2.827654	2.646	22	4.241482	4.690
8	3.428531	2.828	23	4.276827	4.796
9	2.863000	3.000	24	4.170790	4.899
10	3.605259	3.162	25	4.312173	5.000
11	3.852679	3.317	26	4.312173052	5.099
12	3.711296	3.464	27	4.312173052	5.196



13	3.534568	3.606	28	4.312173052	5.292
14	3.923371	3.742	29	4.312173052	5.385

Tabel H.3b Hasil perhitungan model difusi intra partikel pada suhu 40 °C

<b>t</b>	<b>qt (mmol/g)</b>	<b>t<sup>0,5</sup></b>	<b>t</b>	<b>qt (mmol/g)</b>	<b>t<sup>0,5</sup></b>
	y	x		y	x
0	0	0.000	15	2.23273794	3.873
1	0.66648894	1.000	16	2.76592909	4.000
2	0.96640896	1.414	17	2.6326313	4.123
3	1.23300453	1.732	18	2.73260464	4.243
4	1.36630232	2.000	19	2.49933351	4.359
5	1.63289789	2.236	20	2.96587577	4.472
6	1.46627566	2.449	21	2.93255132	4.583
7	1.93281792	2.646	22	2.89922687	4.690
8	2.16608904	2.828	23	3.03252466	4.796
9	1.99946681	3.000	24	3.066	4.899
10	2.33271128	3.162	25	3.066	5.000
11	2.26606238	3.317	26	3.066	5.099
12	2.43268462	3.464	27	3.066	5.196
13	2.16608904	3.606	28	3.066	5.292
14	2.59930685	3.742			

Tabel H.3c Hasil perhitungan model difusi intra partikel pada suhu 50 °C

<b>t</b>	<b>qt (mmol/g)</b>	<b>t<sup>0,5</sup></b>	<b>t</b>	<b>qt (mmol/g)</b>	<b>t<sup>0,5</sup></b>
	y	x		y	x
0	0	0.000	13	2.09104621	3.606
1	0.34279446	1.000	14	2.12532565	3.742
2	0.51419169	1.414	15	2.22816399	3.873
3	0.68558892	1.732	16	2.29672288	4.000
4	0.85698615	2.000	17	2.29672288	4.123
5	1.06266283	2.236	18	2.33100233	4.243
6	1.19978061	2.449	19	2.36528178	4.359
7	1.19978061	2.646	20	2.36528178	4.472
8	1.78253119	2.828	21	2.36528178	4.583
9	1.7139723	3.000	22	2.36528178	4.690
10	1.81681064	3.162	23	2.365	4.796
11	1.98820787	3.317	13	2.09104621	3.606
12	2.02248732	3.464	14	2.12532565	3.742

Nilai  $k_{id}$  masing-masing suhu dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$q_t = k_{id} t^{\frac{1}{2}} + C$$
$$y = ax + b$$

Pada suhu 30 °C

Persamaan diatas analog dengan bentuk persamaan berikut.

$$y = 0,7342x + 0,7994$$
$$R^2 = 0,9850$$

Sehingga diperoleh,

$$k_{id} = a = 0,7342$$
$$C = b = 0,7994$$

Pada suhu 40 °C

Persamaan diatas analog dengan bentuk persamaan berikut.

$$y = 0,5792x + 0,2282$$
$$R^2 = 0,9709$$

Sehingga diperoleh,

$$k_{id} = a = 0,5792x$$
$$C = b = 0,2282$$

Pada suhu 50 °C

Persamaan diatas analog dengan bentuk persamaan berikut.

$$y = 0,5781x - 0,1416$$
$$R^2 = 0,9557$$

Sehingga diperoleh,

$$k_{id} = a = 0,5781x$$
$$C = b = 0,1416$$

## LAMPIRAN I: ANALISA DATA TERMODINAMIKA

Analisa termodinamika dalam penelitian ini meliputi penentuan perubahan energi bebas Gibbs ( $\Delta G$ ), entropi ( $\Delta S$ ) dan entalpi ( $\Delta H$ ).

### 1. Penentuan Entalpi ( $\Delta H$ ) dan Entropi ( $\Delta S$ )

Entalpi dapat ditentukan melalui plot linear antara  $\ln P/P^0$  sebagai sumbu y dan  $1/T$  sebagai sumbu x melalui persamaan vant Hoff berikut.

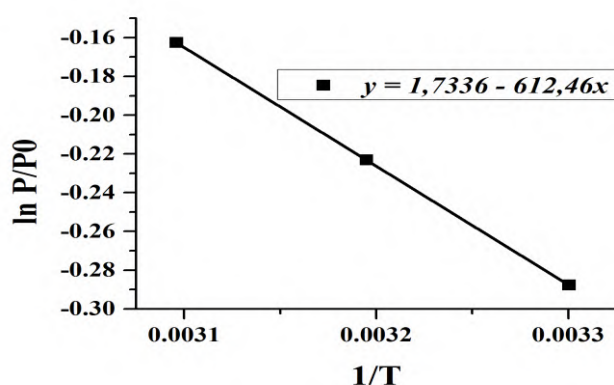
$$\ln \frac{P}{P^0} = \left( \frac{\Delta H}{RT} - \frac{\Delta S_H}{R} \right)$$

Keterangan :

$\Delta H$  : entalpi (kJ/mol)  
 $R$  : Tetapan gas (8,314 J/mol K)  
 $T$  : Suhu (K)  
 $P$  : Tekanan sistem (bar)  
 $P^0$  : Tekanan awal (bar)  
 $\Delta S$  : Entropi (J/mol K)

Tabel I.1 Hasil perhitungan entalpi dan entropi

$P^0$ (bar)	T (K)	$1/T$ ( $K^{-1}$ )	P (bar)	$P/P^0$	$\ln P/P^0$
1	303	0,0033	0.75	0.75	-0.28768
	313	0,0032	0.8	0.8	-0.22314
	323	0,0031	0.85	0.85	-0.16252



Gambar I.1 Grafik plot  $\ln(P/P^0)$  terhadap  $1/T$

Berdasarkan grafik diatas, harga  $\Delta H$  dapat dihitung dari slope dan  $\Delta S$  diperoleh dari intersep sebagai berikut.

$$y = -612,46x + 1,7336$$

$$y = ax + b$$

Sehingga diperoleh,

$$a = \frac{\Delta H}{R} = -612,46$$

$$\Delta H = -612,46 \times 8,314$$

$$\Delta H = -5091,99 \text{ J/mol}$$

$$\Delta H = -5,092 \text{ kJ/mol}$$

$$b = -\frac{\Delta S}{R} = 1,7336$$

$$\Delta S = -8,314 \times 1,7336$$

$$\Delta S = -14,413 \frac{\text{J}}{\text{K mol}}$$

## 2. Penentuan Energi Bebas Gibbs ( $\Delta G$ )

Energi bebas Gibbs ( $\Delta G$ ) dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Pada suhu 30 °C

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

$$\Delta G = -5092,16 \text{ J/mol} - 303\text{K}(-14,413 \frac{\text{J}}{\text{K mol}})$$

$$\Delta G = -724,851 \text{ J/mol}$$

$$\Delta G = -0,725 \text{ kJ/mol}$$

Selanjutnya, dapat dihitung sesuai dengan suhu adsorpsi. Hasil perhitungan tertera pada Tabel K.1.

Tabel I.2 Hasil perhitungan termodinamika

Suhu	P <sub>eq</sub> (bar)	P <sup>o</sup> (bar)	ΔH(kJ/mol)	ΔS(kJ/mol)	ΔG (kJ/mol)
30 °C	0,750	1	-5,092	-0,0144	-0,725
40 °C	0,800	1			-0,581
50 °C	0,850	1			-0,283

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Sintesis zeolit-X berpendukung serat alam berhasil dilakukan dengan metode hidrotermal pada variasi aktivasi dan jenis serat alam. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa serat kapas /*Gossypium hirsutum* L., kapuk/*Ceiba petandra* B., dan nanas/*Ananas comosus* memiliki waktu aktivasi optimum yang sama yaitu 24 jam. Akan tetapi, ketiga jenis serat tersebut memiliki kristalinitas relatif zeolit-X yang berbeda-beda pada waktu aktivasi optimum tersebut. Kristalinitas tertinggi diperoleh pada zeolit-X berpendukung serat nanas dengan kristalinitas relatif 71,0% diikuti serat kapuk 65,0% dan serat kapas 55,5%. Hal ini dipengaruhi oleh kadar dan jenis selulosa masing-masing serat alam. Stabilitas termal untuk zeolit-X berpendukung serat alam mencapai 300 °C .

Kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> yang diperoleh dari zeolit-X berpendukung serat kapas /*Gossypium hirsutum* L., kapuk/*Ceiba petandra* B., dan nanas/*Ananas comosus* pada suhu 30 °C dengan tekanan 1 bar berturut-turut sebesar 12,88% ; 15,09% dan 18,97% berat. Sementara itu, kapasitas desorpsi CO<sub>2</sub> pada suhu dan tekanan yang sama diperoleh berturut-turut sebesar 10,74%; 12,85% dan 16,64%. Berdasarkan hasil tersebut, zeolit-X berpendukung serat nanas lebih efektif sebagai material adsorben CO<sub>2</sub> dibandingkan kedua jenis serat yang lain.

Kinetika adsorpsi CO<sub>2</sub> pada material zeolit-X berpendukung serat nanas mengikuti model kinetika difusi intra partikel. Proses adsorpsi CO<sub>2</sub> dalam material ini menggunakan proses fisisorpsi dengan entalpi ( $\Delta H$ ) sebesar -5,092 kJ/mol yang berlangsung secara eksotermis. Proses adsorpsi terjadi secara spontan dengan energi bebas Gibbs ( $\Delta G$ ) pada suhu 30 °C, 40 °C dan 50 °C berturut-turut sebesar -0,725 ; -0,581 dan -0,283 kJ/mol dan nilai entropi sebesar -0,0144 kJ/K mol.

## **5.2 Saran**

Pada penelitian ini zeolit-X berpendukung serat nanas memiliki kapasitas adsorpsi dan desorpsi CO<sub>2</sub> yang cukup tinggi karena memiliki luas permukaan dan rasio volume mikropori yang tinggi. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk adsorpsi desorpsi gas-gas rumah kaca yang lain.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abidi, N., Cabrales, L dan Hequest, E., (2010), "Thermogravimetric Analysis of Developing Cotton Fibers", *Thermochimica Acta*, Vol. 498, hal. 27–32.
- Abiola, O.S., Kupolati, W.K., Sadiku, E.R dan Ndambuki, J.M., (2014), "Utilisation of Natural Fibre as Modifier in Bituminous Mixes: A Review", *Construction and Building Materials*, Vol.54, hal. 305–312.
- Ackley, M.W., Rege, S.U dan Saxena, H., (2003), "Application of Natural Zeolites in The Purification and Separation of Gases" *Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 61, hal. 25–42.
- Adamson, A.W dan Gast, A.P., (1997), *Physical Chemistry of Surfaces*, Sixth Edition, Wiley-Interscience, New York
- Aguado, S., Gascon, J., Farrusseng, D., Jansen, J.C dan Kapteijn, F., (2011), "Simple Modification of Macroporous Alumina Supports for The Fabrication of Dense NaA Zeolite Coatings: Interplay of Electrostatic and Chemical Interactions", Vol. 146, hal. 69–75.
- Ahad, N, A., Parimin, N., Mahmed, N., Ibrahim, S,S., Nizzam, K dan Ho, Y, M., (2009), "Effect of Chemical Treatment on The Surface of Natural Fiber", *Journal of Nuclear and Related Technologies*, Vol. 6, hal. 1-5.
- Alomayri, T dan Low, I.M., (2013), "Synthesis and Characterization of Mechanical Properties in Cotton Fiber-Reinforced Geopolymer Composites", *Journal of Asian Ceramic Societies*, Vol.1, hal. 30–34.
- Atkins P., Overton T., Rourke J., Weller M., Armstrong F. dan Hagerman, M., (2010) *Inorganic Chemistry.*, W. H. Freeman and Company, New York.
- Azwa, Z.,Yousif, B., Manalo, A dan Karunasena, W., (2008), "A Review on the Degradability of Polymeric Composites Based on Natural Fibres", *Center of Excellence in Engineered Fiber Composites (CEEFC)*, University Southern Queensland, Australia.
- Azizah, I., (2008), "Uji Ketahanan Aksesori Kapas (*Gossypium Hirsutum* L.) Terhadap Cekaman Salinitas (NaCl) pada Fase Perkecambahan, Skripsi. Universitas Islam Negeri Malang, Malang.
- Baerlocher, C., McCusker, L. B dan Olson D. H., (2007), "Introduction and explanatory notes. In Atlas of Zeolite Framework Types (Sixth Edition), eds. C. Baerlocher and L. B. M. H. Olson), *Elsevier Science B.V*, Amsterdam.



- Barquist, K.N., (2009), "Synthesis and Environmental Adsorption Applications of Functionalized Zeolites and Iron Oxide/Zeolite Composites, The University of Iowa.
- Benyahia, A., Merrouche, A., Rokbi, M dan Kouadri, Z., (2013), "Study the effect of alkali treatment of natural fibers on the mechanical behavior of the composite unsaturated Polyester-fiber Alfa", *21ème Congrès Français de Mécanique*, hal 1-6.
- Biljana, P., M. Skundric, P dan Praskalo, J., (2008), "The Effects of Hemicelluloses and Lignin Removal on Water Uptake Behavior of Hemp Fibers", *Bioresource Technology*, Vol. 99, hal. 7152–7159.
- Broom, Darren. P. (2011), *Hydrogen Storage Materials-The Characterisation Their Storage Properties*, Springer London Dordrecht Heidelberg, New York.
- Calabia, B., Ninomiya, F., Yagi, H., Oishi, A., Taguchi, K., Kunioka, M dan Funabashi, M., (2013), "Biodegradable Poly(butylene succinate) Composites Reinforced by Cotton Fiber with Silane Coupling Agent", *Polymers* Vol. 5, hal. 128–141.
- Carrillo, C.A., Laine, J dan Rojas, O.J., (2014), "Microemulsion Systems for Fiber Deconstruction into Cellulose Nanofibrils", *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol 6, hal. 22622–22627.
- Chandramohan, D dan Marimuthu, K., (2011).," A review on Natural Fibers", *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, Vol. 8, hal. 194–206.
- Cheung, H., Ho, M., Lau, K., Cardona, F dan Hui, D., (2009), "Natural Fibre-Reinforced Composites For Bioengineering And Environmental Engineering Applications", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 40, hal. 655–663.
- Cinke, M., Li, J. dan Bauschlicher, C.W., (2003), "CO<sub>2</sub> adsorption in single-walled carbon nanotubes", *Chemical Physical Letters*, Vol. 376, hal. 761-766
- Chorkendroff, I dan Neimantsvendriet J. W. (2003) *Concepts of Modern Catalysis and Kinetics.*, Willey-VCH Verlag gmbH and Co.KGaA, Weinheim.
- Damapoli, M., Lukum, A dan Paputungan, M., (2013), "Pembuatan Adsorben Selulosa dari Serat Daun Nanas (*Ananas comosus*), Universitas Negeri Gorontalo, hal. 2-11.
- Draman, S, F, S., Daik, R., Latif, F, A dan EL-Sheikh, S, M., (2014), "Characterization and Thermal Decompositition Kinetics of Kapok (*Ceiba petandra* L.)-Based Cellulose", *Bioresources*, Vol 9(1), hal. 8-23.

- Delavar M., Asghar Ghoreyshi A., Jahanshahi M., Khalili S. dan Nabian N. (2012) “Equilibria and kinetics of natural gas adsorption on multi-walled carbon nanotube material”, *RSC Adv.* Vol. 2, hal. 4490–4497.
- Demir, H., Atikler, U., Balköse, D dan Tihminlioğlu, F., (2006), “The Effect of Fiber Surface Treatments on The Tensile and Water Sorption Properties of Polypropylene–Luffa Fiber Composites”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 37, hal. 447–456.
- Devianti, V., (2014), “Sintesis Zeolit-X Berpendukung Material Serat Dengan Variasi Suhu Dan Waktu Hidrotermal Untuk Adsorpsi Gas Karbon Dioksida”, Thesis, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya.
- Dicker, M.P., uckworth, P., Baker, A., Francois, G dan Hazzard, M., (2014), “Green composites: A review of material attributes and complementary applications”, *Composites: Part A*, Vol. 56, hal. 280–289.
- Dorez, G., Ferry, L., Sonnier, R., Taguet, A dan Lopez-Cuesta, J., (2014), “Effect of Cellulose, Hemicellulose and Lignin Contents on Pyrolysis and Combustion of Natural Fibers”, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 107, hal. 323–331.
- Faruk, O., Bledzki, A.K., Fink, H.-P dan Sain, M., (2012), “Biocomposites Reinforced with Natural Fibers: 2000–2010”, *Progress in Polymer Science* Vol. 37, hal.1552–1596.
- Florin, N., (2010), ‘Review of Advanced Carbon Capture Technologies’, *Review*, Grantham Institute.
- Gamal, A.M., Farha, S.A., Sallam, H.B dan Mahmoud, G.E.A., Ismail, L.F.M., (2010), “Kinetic Study and Equilibrium Isotherm Analysis of Reactive Dyes Adsorption Onto Cotton Fiber”, *Nature and Science*, Vol. 8, hal. 95–110.
- Georgiev, D., Bogdanov, B., Markovska, I dan Hristov, Y., (2013), “A Study on The Synthesis and Structure of Zeolite NaX”, *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, Vol. 48. Hal. 168-173.
- Gougazeh, M dan Buhl, J.-C., (2014), “Synthesis and Characterization of Zeolite A By Hydrothermal Transformation of Natural Jordanian Kaolin”, *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Science*, Vol. 15, hal.35–42.
- Gunawan, T., (2015),” Adsorpsi-Desorpsi CO<sub>2</sub> pada Material Karbon Tertemplat Zeolit-Y dengan Variasi Suhu, Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh November.
- Hafeez, S., Fan, X dan Hussain, A., (2015),” A Kinetic Study of CO<sub>2</sub> Adsorption in Cellulose Acetate Membranes,” *International Journal of Environmental Science and Development*, Vol. 6, hal.1-4.

- Hammond, C.,(2009), “The Basics of Crystallography and Diffraction”, (International Union of Crystallography Texts on Crystallography), Third. ed. Oxford Science.
- Haucchhum, L dan Muhanta, P., (2014), “Carbon Dioxide Adsorption on Zeolites And Activated Carbon by Pressure Swing Adsorption in A Fixed Bed”, *International Journal, Energy Environment Enginering*, Vol. 5, hal. 349–356
- Hedin, N., Andersson, L., Bergström, L dan Yan, J., (2013), “Adsorbents for The Post-Combustion Capture of Co<sub>2</sub> Using Rapid Temperature Swing or Vacuum Swing Adsorption”, *Applied Energy*, Vol. 104, hal. 418–433.
- Herzog, H., Meldon, J dan Hatton, A., (2009), “Advanced Post-Combustion CO<sub>2</sub> Capture”, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 44, hal. 6423–6434.
- Hester, R dan Harrison, R., (2010),” *Carbon Capture Suquestration and Storage*”, Royal Society of Chemistry, UK.
- Hirscher, M. 2009. *Handbook of Hydrogen Storage: New Materials for Future Energy Storage*. Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. KgaA, Germany, hal. 12-44.
- Hidayat, P, 2008. “Teknologi Pemanfaatan Serat Daun Nanas Sebagai Alternatif Bahan Baku Tekstil”, *Jurnal Teknoin*, Vol. 13. Hal. 31-35.
- Hori, K., Flavier, M.E., Kuga, S., Lam, T.B.T dan Iiyama, K., (2000), “Excellent Oil Absorbent Kapok (Ceiba Pentandra L.) Fiber: Fiber Structure”, *Chemical Characteristics, and Application. Journal of Wood Science*, Vol. 46, hal. 401–404.
- Iyoki, K., Itabashi, K dan Okubo, T., (2014), “ Progress in Seed-Assisted Synthesis Of Zeolites without Using Organic Structure-Directing Agents”, *Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 189, hal. 22–30.
- Jaschik, M., Lyngfelt, A., Span, R., Tanczyk, M., Abu-Ghararah, Z dan Yashima, T., n.d. “IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage”, *IPCC*.
- Jayanudin., Hartono dan Jamil, N, H., (2010), “Pengaruh Konsentrasi dan Waktu Pemutihan Serat Daun Nanas Menggunakan Hidrogen Peroksida,” *Seminar Rekayasa Kimia Dan Proses* , ISSN : 1411-4216, hal. 1-6.
- Ji, F., Li, C., Tang, B., Xu, J., Lu, G dan Liu, P., (2012),” Preparation of Cellulose Acetate/Zeolite Composite Fiber and Its Adsorption Behavior for Heavy Metal Ions in Aqueous Solution”, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 209, hal. 325–333.

- Jiao, C. dan Xiong, J., (2014), “ Accessibility and Morphology of Cellulose Fibers Treated with Sodium Hydroxide”, *Bioresources*, Vol. 9(4), hal. 6504-6513.
- Johnson, E.B.G dan Arshad, S.E., (2014),” Hydrothermally Synthesized Zeolites Based on Kaolinite: A Review”, *Applied Clay Science*, Vol. 97–98, hal. 215–221.
- Joseph, K., Filho, R. D.T., Thomas, S dan Hecker, L., (1999),” A Review On Sisal Fiber Reinforced Polymer Composites”, *Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental*, Vol. 3, hal. 367-379.
- Jumaeri, J., Astuti, W dan Lestari, W.T.P., (2007), “Preparasi dan Karakterisasi Zeolit dari Abu Layang Batubara Secara Alkali Hidrotermal”, *Reaktor*, Vol. 11, hal. 38–44.
- Kabir, M.M., Wang, H., Aravinthan, T., Cardona, F dan Lau, K.-T., (2011), “ Effects of Natural Fibre Surface on Composite Properties: A Review,”, *in Proceedings of The 1st International Postgraduate Conference on Engineering, Designing and Developing the Built Environment for Sustainable Wellbeing (edBE2011)*. Queensland University of Technology, hal. 94–99.
- Kadja, G.T., Rilyanti, M., Mukti, R.R., Marsih, I.N., Ismunandar, I., (2013), “Strategi Sintesis Zeolit Hirarkis: Kajian Metode Cetak Lunak dan Cetak Keras”, *Jurnal Matematika & Sains*, Vol. 18, hal. 103–114.
- Kaewpirom, S., Worrarat, C., (2014), “Preparation and Properties of Pineapple Leaf Fiber Reinforced Poly(Lactic Acid) Green Composites”, *Fibers and Polymers*, Vol. 15, hal. 1469–1477.
- Kamath, M.G., Bhat, G.S., Parikh, D.V dan Mueller, D., (2005), “Cotton Fiber Nonwovens for Automotive Composites”, *International Nonwovens Journal*, Vol. 14, hal. 34–40.
- Kausihik, V, K ., Kumar, A dan Kalin, S., (2012), “Effect of Mercerization and Benzoyl Peroxide Treatment on Morphology, Thermal Stability and Crystallinity of Sisal Fibers”, *International Journal of Textile Science*, Vol. I(6), hal. 101-105.
- Keshavarz, P., Fathikalajahi, J dan Ayatollahi, S., (2008), “Analysis of CO<sub>2</sub> Separation And Simulation of A Partially Wetted Hollow Fiber Membrane Contactor”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 152, hal.1237–1247.
- Khan, A.R., Tahir, H., Uddin, F dan Hameed, U., (2005), “ Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution on the Surface of Wood Fiber and Cotton Fiber”, *Applied Science Environment*, Vol. 9, hal. 29-35.

- Khanday, W., Majid, S dan Shekar, S., (2014), "Dynamic Adsorption of DMMP Over Synthetic Zeolite-Alpha", *Arabian Journal of Chemistry*, Vol. 7, hal. 115–123.
- Konwar, R.J dan De, M., (2013), "Effects of Synthesis Parameters on Zeolite Templated Carbon for Hydrogen Storage Application", *Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 175, hal. 16–24.
- Kumar, G., Viswandham, M dan Gupta, A.V.S.S.K., (2013), "A Review of Pre-Combustion CO<sub>2</sub> Capture In IGCC", *International Journal of Research in Engineering and Technology*, Vol. 2. Hal. 847-853.
- Lee, J., Kim, J., Suh, J., Lee, JM dan Lee, C., (2002), "Adsorption Equilibria of CO<sub>2</sub> on Zeolite 13X and Zeolite X/Activated Carbon Composite", *Journal Chemistry Engineering*, Vol. 47, hal. 1237-1242.
- Lopattananon, N., Panawarangkul, K., Sahakaro, K dan Ellis, B., (2006), "Performance of Pineapple Leaf Fiber-Natural Rubber Composites: The Effect of Fiber Surface Treatments", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.102, hal. 1974-1984.
- Leung, D.Y., Caramanna, G dan Maroto-Valer, M., (2014), "An overview of Current Status of Carbon Dioxide Capture and Storage Technologie", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 39, hal. 426–443.
- Li, J., Shao, J., Ge, Q., Wang, G., Wang, Z dan Yan, Y., (2012), "Influences of The Zeolite Loading and Particle Size in Composite Hollow Fiber Supports on Properties of Zeolite NaA Membranes", *Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 160, hal. 10–17.
- Li, Y., Yi, H., Tang, X., Li, F dan Yuan, Q., (2013), "Adsorption Separation of CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> Gas Mixture on The Commercial Zeolites at Atmospheric Pressure", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 229, hal. 50–56.
- Liu, W., Misra, M., Askeland, P., Drzal, L.T dan Mohanty, A.K., (2005), "Green Composites from Soy Based Plastic and Pineapple Leaf Fiber: Fabrication And Properties Evaluation", *Polymer*, Vol. 46, hal. 2710–2721.
- Liu, J dan Wang, F., (2011), "Influence of Mercerization on Micro-structure and Properties of Kapok Blended Yarns with Different Blending Ratios", *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* 63, Vol. 6, hal. 63-68.
- Liu, J., Jiang, G., Liu, Y., Di, J., Wang, Y., Zhao, Z., Sun, Q., Xu, C., Gao, J., Duan, A., Liu, J., Wei, Y., Zhao, Y dan Jiang, L., (2014), "Hierarchical Macro-meso-microporous ZSM-5 Zeolite Hollow Fibers with Highly Efficient Catalytic Cracking Capability", *Scientific Report*, Vol. 4. Hal. 1-6.

- Ma, Y., Yan, C., Alshameri, A., Qiu, X., Zhou, C dan li, D., (2014), “Synthesis and Characterization of 13x Zeolite from Low-Grade Natural Kaolin”, *Advanced Powder Technology*, Vol. 25, hal. 495–499.
- Mahmuda, E., (2013). “Pengaruh Panjang Serat Terhadap Sifat Mekanik dan Fisik Komposit Berpenguat Serat Ijuk dengan Matrik Epoxy”, *Jurnal FEMA*, Vol.1. hal. 79-84.
- Mangal, R., Saxena, N.S., Sreekala, M.S., Thomas, S dan Singh, K., (2003), “Thermal Properties of Pineapple Leaf Fiber Reinforced Composite”, *Materials Science and Engineering*, Vol. 339, hal. 281–285.
- Masika, E dan Mokaya, R., (2013), “Preparation of Ultrahigh Surface Area Porous Carbons Templated Using Zeolite 13x for Enhanced Hydrogen Storage”, *Progress in Natural Science: Materials International*, Vol. 23, hal. 308–316.
- Masoudian, S.K., Sadighi, S dan Abbasi, A., (2013), “Synthesis and Characterization of High Aluminum Zeolite X from Technical Grade Materials”, *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, Vol. 8, hal. 54–60.
- Michalev, T dan Petrov, I., (2012), “The Removal of Heavy Metal Ions by Synthetic Zeolites: A Review”, *Proceedings, University of Ruse*, Vol.51, hal. 79–84.
- Milanese, A., Cioffi, M dan Voorwald, H.J., (2011), “Mechanical Behavior of Natural Fiber Composites”, *Procedia Engineering*. Vol. 10, hal. 2022–2027.
- Mitra, B., (2014), “Environment Friendly Composite Materials: Biocomposites and Green Composites”, *Defence Science Journal*, Vol. 64, hal. 244–261.
- Mokhtar, M., Hassan, A., Rahmat, A.R dan Abd Samat, S., (2007), “Characterization and Treatments of Pineapple Leaf Fibre Thermoplastic Composite for Construction Application”, University Technology Malaysia.
- Mulyawati, E.C., (2012), “Pembuatan dan karakterisasi Membran Nanofiltrasi untuk Pengolahan Air”, Tesis, Universitas Diponegoro, Semarang.
- Mwaikambo, L., (2006), “Review of The History, Properties and Application of Plant Fibres”, *African Journal of Science and Technology (AJST), Science and Engineering*, Vol. 7, hal. 120–133.
- Nagib, H., Kandi, U dan Hashem, A., (2015), “Effect of Fiber Loading on The Mechanical and Physical Properties of “Green” Bagasseepolyester Composite”, *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, hal. 1–5.

- Neto, A.R., Araujo, M.A.M., Barboza, R.M.P., Fonseca, A.S., Tonoli, G.H.D., Souza, F.V.D., Mattoso, L.H.C dan Marconcini, J.M., (2015), “Comparative Study of 12 Pineapple Leaf Fiber Varieties for Use As Mechanical Reinforcement in Polymer Composites”, *Industrial Crops and Products*, Vol. 64, hal. 68–78.
- Nikmah, R., (2009), “Sintesis Zeolit A Dari Abu Dasar Bebas Sisa Karbon dari PLTU PT. Ipmomi dengan Metode Hidrotermal Langsung, Tesis, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya.
- Nizmah, S., (2010), “Karakterisasi Komposit Linear Low Density Polyethylene-Serat Nanas-Organoclay Pacitan”, Skripsi, Universitas Indonesia, Depok.
- Onat, M.D., Vaidya, U dan Lungu, C., (2012), “Physical Adsorption Properties of Natural Fibers and Natural Fiber Based Activated Carbons for CO<sub>2</sub> Emissions.
- Ozdemir, O.D dan Pişkin, S., (2013), “Zeolite X Synthesis with Different Sources”, *International Journal of Chemical 1*, ISSN 2320–4087.
- Permatasari, H, R., Gulo F dan Lesmini B., (2013), “Pengaruh Konsentrasi H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dan NaOH Terhadap Delignifikasi Serbuk Bmbu (*Gigantochloa Apus*). Universitas Sriwijaya, hal 131-140.
- Parades, J.I., Martinez-Alonso, A dan Tascon, J.M.D., (2003), “Application of Scanning Tunneling and Atomic Force Microscopies to The Characterization of Microporous and Mesoporous Materials”, *Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 65, hal. 93-126.
- Pejic, B.M., Kostic, M.M., Skundric, P.D dan Praskalo, J.Z., (2008), “The Effects of Hemicelluloses and Lignin Removal On Water Uptake Behavior of Hemp Fibers”, *Bioresource Technology*, Vol. 99, hal. 7152–7159.
- Pickering, K.L., Efendy, M.G.A dan Le, T.M., (2015), “A Review of Recent Developments in Natural Fibre Composites And Their Mechanical Performance”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, hal. 1-15.
- Pillai, R.S., Peter, A,S dan Jasra, R.V., (2012), “CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> Adsorption in Alkali Metal Ion Exchanged X-Faujasite : Grand Canonical Monte Carlo Simulation and Equilibrium Adsorption Studies”, Vol. 162, hal. 143-151.
- Pires, J.C.M., Martins, F.G., Alvim-Ferraz, M.C.M dan Simões, M., (2011), “Recent Developments on Carbon Capture and Storage: An overview”, *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 89, hal. 1446–1460.

- Pothan, L. A., George, J dan Thomas, S., (2002), "Effect of Surface Treatments on The Matrix Interaction in Banana Reinforced Polyester Composites", *Composite Interfaces*, Vol. 9, No. 4, hal. 335–353.
- Prachayawarakorn, J., Chaiwatyothin, S., Mueangta, S dan Hanchana, A., (2013), "Effect of Jute and Kapok Fibers on Properties of Thermoplastic Cassava Starch Composites", *Materials & Design*, Vol. 47, hal. 309–315.
- Pramitasari, D., Ardi, D dan Baso, R., (2013), "Teknologi Produksi Tanaman Komoditas Kapas (*Gossypium* sp)", Skripsi, Fakultas Pertanian Universitas Brawijaya, Malang.
- Prasetyoko, D., Hamid, Abdul., Fanzuri, H dan Hartanto, D., (2010), "Sintesis ZSM-5 Mesopori dengan Metode Pemeraman dan Kristalisasi: Pengaruh Waktu Kristalisasi", *Seminar Rekayasa Kimia dan Proses*, ISSN : 1411-4216, hal. 1-6.
- Prasetyoko, D., Fanzuri, H., Ni'mah, Y,L dan Fadlan, A., (2016), "Karakterisasi Padatan", ISBN 978-602-401-149-9, Deepublish : Yogyakarta.
- Puspita, Y.V., (2015), Variasi Waktu Hidrotermal Pada Sintesis Zeolit-X Berpendukung Serat Gelas Sebagai Material Penyerap Karbon Dioksida", Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
- Putera, R.D., (2012), "Ekstraksi Serat Selulosa dari Tanaman Enceng Gondok (*Eichornia Crassipes*) dengan variasi Pelarut", Skripsi, Universitas Indonesia, Depok.
- Qu, R., Sun, C., Wang, M., Ji, C., Xu, Q., Zhang, Y., Wang, C., Chen, H dan Yin, P., (2009), "Adsorption of Au(III) from Aqueous Solution Using Cotton Fiber/Chitosan Composite Adsorbents ", *Hydrometallurgy*, Vol. 100, hal. 65–71.
- Raimondo, Luciano, S., (2012), "Structured Zeolite Adsorbents for CO<sub>2</sub> Separation", Thesis, Lulea University of Technology, Sweden.
- Rajabzadeh, S., Yoshimoto, S., Teramoto, M., Al-Marzouqi, M dan Deng, H., (2009), "CO<sub>2</sub> Absorption by using PVDF Hollow Fiber Membrane Contactors with Various Membrane Structures", *Separation and Purification Technology*, Vol. 69, hal. 210–220.
- Rachmawati, R., Meriyani, M dan Priyanto, S., (2013), "Sintesis Selulosa Diasetat dari Enceng Gondok (*Eichornia crassipes*) dan Potensinya untuk Pembuatan Membran", *Jurnal Teknologi Kimia dan Industri*, Vol. 2. hal. 8-16.
- Rahman Md, A., (2011), "Study on Modified Pineapple Leaf Fiber", *Journal of Textile and Apparel Technology and Management*, Vol. 7, hal. 1-16.



- Rashidi, N, A., Yusup, S dan Loong, L, H., (2013),” Kinetic Studies on Carbon Dioxide Capture using Activated Carbon”, *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 35, hal. 361-366.
- Rella, P dan Widiastuti, N., (2013), “Sintesis dan Karakterisasi Zeolit-A Berpendukung Material Serat dengan Variasi Jumlah Material Pendukung”, *Jurnal Sains dan Seni POMITS*, Vol. 2, hal. 1–5.
- Riama, G., Veranika, A dan Prasetyowati ., (2012), “Pengaruh H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Konsentrasi NaOH dan waktu terhadap derajat putih Pulp dari Mahkota Nanas”, *Jurnal Teknik Kimia*, Vol. 3, hal. 25-34.
- Rodriguez, E, S., Stefani, P, M dan Vazquez, A., (2010), “Effects of Fibers Alkali Treatment on the Resin Transfer Molding Processing and Mechanical Properties of Jute–Vinylester Composites”, *Journal of Composite Materials*, Vol. 41, hal. 1729-1741.
- Rokbi, M., Osmani, H., Imad, A dan Benseddiq, N., (2011), “Effect of Chemical treatment on Flexure Properties of Natural Fiber-reinforced Polyester Composite”, *Procedia Engineering*, Vol. 10, hal. 2092–2097.
- Sarifudin, S.A., (2013). “Analisa Perilaku Mekanik Kompositserat Kapuk Randu Menggunakan matrik Polyester”, *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, Vol. 1. Hal. 65-72.
- Scarponi, C dan Messano, M., (2015), “Comparative Evaluation Between E-Glass and Hemp Fiber Composites Application in Rotorcraft Interiors”, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 69, hal. 542–549.
- Shalwan, A dan Yousif, B., (2013), “In State of Art: Mechanical and Tribological Behaviour of Polymeric Composites Based on Natural Fibres”, *Materials and Design*, Vol, 48, hal. 14–24.
- Shao, W., Zhang, L., Li, L dan Lee, R.L., (2009), “ Adsorption of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> on Synthesized NaY Zeolite at High Temperatures”, *Adsorption*, Vol. 15, hal. 497–505.
- Silva J. A. C., Schumann, K dan Rodrigues A, E.. (2012), “ Sorption and kinetics of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in binderless beads of 13X zeolite”, *Microporous Mesoporous Mater*, Vol. 158, hal. 219–228.
- Siregar, J, P., Sapuan, S,M., Rahman, M, Z, A dan Zaman, D, K., (2010), “The Effect of Alkali Treatment on The Mechanical Properties of Short Pineapple Leaf Fibre (Palf) Reinforced High Impact Polystyrene (Hips) Composites”, *Journal of Food, Agriculture & Environment*, Vol.8 (2), hal. 1103-1108.

- Siva, N dan Paul, J., (2015), "Fabrication and Experimental Analysis of Pineapple Leaf Fiber Based Composite Material", *International Conference on Recent Advancement in Mechanical Engineering & Technology, Urmal of Chemical and Pharmaceutical Science*, hal. 234–246.
- Song, H., Xin, S,X dan Jun, X., (2003), "Inner-pore Structure Change of Huainan Coal Char Particle during Combustion", *Journal of Chemistry Industrial Engineering*, Vol.54, hal. 107-111.
- Songolzadeh, M., Ravanchi, M.T dan Soleimani, M., (2012), "Carbon Dioxide Capture and Storage: A General Review on Adsorbents", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 70, hal. 225–232.
- Songolzadeh, M., Soleimani, M., Takht Ravanchi, M dan Songolzadeh, R., (2014), "Carbon Dioxide Separation from Flue Gases: A Technological Review Emphasizing Reduction in Greenhouse Gas Emissions", *The Scientific World Journal*, 2014, hal. 1–34.
- Suci, F., (2015), "Adsorpsi Hidrogen pada Material Karbon Tertemplat Zeolit-Y Dengan Aktivasi  $K_2CO_3$ ", Tesis, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya.
- Supri, A.G dan Lim, B.Y., (2009), "Effect of Treated and Untreated Filler Loading on The Mechanical, Morphological, and Water Absorption Properties of Water Hyacinth Fibers-Low Density Polyethylene Composites", *Journal of Physical Science*, Vol. 20, hal. 85–96.
- Sumin, L., Youguang, M., Chunying, Z dan Shuhua, S., (2009), "The Effect of Hydrophobic Modification of Zeolites on  $CO_2$  Absorption Enhancement. Chinese Journal of Chemical Engineering", *Separation Science And Engineering*, Vol. 17, hal. 36–41.
- Svilovic,D., Rusic dan Zanetic, R., (2008), " Thermodynamic and Adsorption Isotherms of Copper Ion Removal from Solution Using Synthetic Zeolit X," *Chem. Biochem. Eng*, Vol. 22. hal. 299-305
- Syafiisab, A., (2010), "Pengaruh Komposit Core Berbasis Limbah Kertas, dengan Pencampur Sekam Padi, dan Serabut Kelapa Terhadap Kekuatan Bending Panel", Skripsi, Universitas Sebelas Maret.
- Syakir, M., (2011), "Inovasi Teknologi Mendukung Pengembangan Serat Alam Nasional", *Seminar Serat Alam Balittas Malang*, hal 1-7.
- Siroky, J., Richard, S., Blackburn., Bechtold, T., Taylor, J dan White, P., (2011), "Alkali treatment of cellulose II fibres and effect on dye sorption", *Carbohydrate Polymers*, Vol. 84, hal. 299-307.

- Tedds, S., Walton, A., Broom, D.P. dan Book, D., (2011), “ Characterisation of Porous Hydrogen Storage Materials: Carbons, Zeolites, MOFs and PIMs”, *Faraday Discussion*, Vol. 151, hal. 75.
- Thiruvengkatachari, R., Su, S., Yu, X dan Bae, J., (2013),” Application of Carbon Fibre Composites to CO<sub>2</sub> Capture From Flue Gas”, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 13, hal. 191–200.
- Thomason, J.L., Yang, L dan Meier, R., (2014), “The Properties of Glass Fibres After Conditioning at Composite Recycling Temperatures”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 61, hal. 201–208.
- Tissera, N.D., Wijesena, R.N., Perera, J.R., de Silva, K.M.N dan Amaratunge, G.A.J., (2015), “Hydrophobic Cotton Textile Surfaces Using an Amphiphilic Graphene Oxide (GO) Coating”, *Applied Surface Science*, Vol. 324, hal. 455–463.
- Tseng, R.-L., Wu, P.-H., Wu, F.-C dan Juang, R.-S., (2014), “Convenient Method to Determine Kinetic Parameters of Adsorption Processes by Nonlinear Regression of Pseudo-Nth-Order Equation”, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 237, hal. 153–161.
- Tyastari, A., (2015), “Variasi Suhu Hidrotermal pada Sintesis Zeolit-X Berpendukung Serat Gelas untuk Adsorpsi Gas CO<sub>2</sub>”, Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Ugal, J.R., Kareem, S dan Hassan, S S., (2013), “ Adsorption of Hydrogen Sulphide on the Zeolite Type A Synthesized from Iraqi Kaoline,” *J. Baghdad for Science*, Vol. 10, hal. 1022-1033
- Xu, C dan Hedin, N., (2014), “Microporous Adsorbents for CO<sub>2</sub> Capture – A Case for Microporous Polymers”, *Material Today*, Vol. 17, hal. 8.
- Vu, D., Marques, M dan Larsen, G., (2002), “A Facile Method to Deposit Zeolites Y And L onto Cellulose Fibers”, *Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 55, hal. 93–101.
- Wall, T., (2007), “Combustion Processes for Carbon Capture”, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31.
- Walton, K.S., Abney, M.B dan Douglas LeVan, M., (2006), “CO<sub>2</sub> Adsorption in Y and X Zeolites Modified by Alkali Metal Cation Exchange”, *Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 91, hal. 78–84.
- Wang, Y dan Zhou, M., (2008), “Structure and Adsorptive Properties in Wastewater Treatment of Activated Carbon Fiber Based on Kapok”, *IEEE*, hal. 2821-2824.

- Wang, M., Lawal, A., Stephenson, P., Sidders, J dan Ramshaw, C., (2011), "Post-Combustion CO<sub>2</sub> Capture with Chemical Absorption: A State-of-The-Art Review", *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 89, hal. 1609–1624.
- Wang, J., Zheng, Y dan Wang, A., (2012), "Superhydrophobic Kapok Fiber Oil-Absorbent: Preparation and High Oil Absorbency", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 213, hal. 1–7.
- Wardani, A.R., (2014), "Sintesis Zeolit-X Berpendukung Serat Gelas sebagai Material Penyerap CO<sub>2</sub> : Variasi Waktu Perendaman dan Konsentrasi NaOH pada Aktivasi Serat Gelas", Skripsi. Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya
- West A. R. (2014), "Solid state chemistry and its application", 2nd ed., John Willey and Sons, United Kingdom.
- Westman, M.P., Fifield, L.S., Simmons, K.L., Laddha, S.G dan Kafentzis, T.A., (2010), "Natural Fiber Composites: A Review", Pacific Northwest National Laboratory.
- Widiastuti N., Wu H., Ang H. M dan Zhang D. (2011), "Removal of ammonium from greywater using natural zeolite", *Desalination*, Vol. 277, hal. 15–23.
- Widiastuti, N., Hidayah, M.Z., Praseytoko, D dan Fansuri, H., (2014), " Synthesis of Zeolite X-Carbon from Coal Bottom Ash for Hydrogen Storage Material", *Advanced Materials Letters*.
- Widjaya, R, R., Soegijono, B dan Rinalsi, N., (2012), "Characterization of Cr/Bentonite and HZSM-5 Zeolite as Catalysts for Ethanol Conversion to Biogasoline", *Makara Journal of Science*, Vol. 16, hal. 65-70.
- Willard, H., (1988), "Instrumental Method of Analysis", 7th ed. Wadsworth Publishing.
- Witanto, E., Trisunaryanti, W dan Triyono., (2010)," Preparasi dan Karakterisasi Katalis Ni-Mo/Zeolit Alam Aktif", *Seminar Nasional VI SDM Teknologi Nuklir*, ISSN 1978-0176, hal. 739-746.
- Witono, K., Irawan, Y.S., Soenoko, R dan Suryanto, H., (2014), "Pengaruh Perlakuan Alkali (NaOH) Terhadap Morfologi dan Kekuatan Tarik Serat Mendong", *Rekayasa Mesin*, Vol. 4, hal. 222-227.
- Wijoyo, Nurhidayat, A dan Catur Purnomo, (2011), "Optimasi Kekuatan Tarik Serat Nanas (Ananas Comous L. merr) sebagai Alternatif Bahan Komposit Serat Alam", in: Prosiding Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Fakultas Teknik.

- Yasumori, A., Yanagida, S dan Sawada, J., (2015), "Preparation of a Titania/X-Zeolite/Porous Glass Composite Photocatalyst using Hydrothermal and Drop Coating Processes", *Molecules*, Vol. 20, hal. 2349-2363.
- Yu, C.-H., (2012), "A Review of CO<sub>2</sub> Capture by Absorption and Adsorption. Aerosol and Air Quality Research".
- Yu, L., Gong J., Zeng, C dan Zhang, L., (2013), "Synthesis of Binderless Zeolite-X Microspheres and Their CO<sub>2</sub> Adsorption Properties", *Separation and Purification Technology*, Vol. 118, hal. 188-195.
- Yi, H., Deng, H., Tang, X., Yu, Q., Zhou, X dan Liu, H., (2012), "Adsorption Equilibrium and Kinetics for SO<sub>2</sub>, NO, CO<sub>2</sub> on Zeolites FAU and LTA", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 203-204, hal. 111-117.
- Yimer, T., (2013), "Development of Natural Fiber Composites for Automotive Applications", Addis Ababa Institute of Technology (AAIT) School of Mechanical and Industrial Engineering Addis Ababa University, Ethiopia.
- Zaarour, M., Dong, B., Naydenova, I., Retoux, R dan Mintova, S., (2014), "Progress in Zeolite Synthesis Promotes Advanced Applications", *Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 189, hal. 11-21.
- Zhang, Y., Mancke, G., Sabelfeld, M dan Geißen, S., (2014), "Adsorption of Trichlorophenol on Zeolite and Adsorbent Regeneration with Ozone", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 271, hal. 178-184.
- Zheng, Y., Wang, W., Huang, D dan Wang, A., (2012), "Kapok Fiber Oriented-Polyaniline Nanofibers for Efficient Cr(VI) Removal", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 191, hal. 154-161.
- Zheng, Y., Wang, J., Zhu, Y dan Wang, A., (2015), "Research and Application Of Kapok Fiber as an Absorbing Material: A Mini Review", *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 27, hal. 21-32.
- Zhou, Z., Jin, G., Wu, J dan Mei, J., (2014), "Crystallization Mechanism of Zeolite A From Coal Kaolin Using A Two-Step Method", *Applied Clay Science*, Vol. 97-98, hal. 110-114.
- Zhu, J., Zhu, H., Njuguna, J dan Abhyankar, H., (2013), "Recent Development of Flax Fibres and Their Reinforced Composites Based on Different Polymeric Matrices", *Materials*, Vol. 6, hal. 5171-5198.
- Zulfa, A., (2011), "Uji Adsorpsi Gas Karbon Monoksida (CO) menggunakan Zeolit Alam Malang dan Lampung, Skripsi, Universitas Indonesia, Depok.

Zsiros, J.A., (2010), "Natural Fibers and Fiberglass: A Technical and Economic Comparison". *All Theses and Disertations*, Brigham Young University.

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## BIODATA PENULIS



Mada Mariana Lakapu, dilahirkan di Oinlasi - NTT pada tanggal 09 Mei 1990 dan merupakan anak ketiga dari 6 bersaudara pasangan Bapak Moses Lakapu dan Ibu Naema Lakapu-Henukh. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Negeri Eonfetnai (1996-2002), SMP Negeri 1 Amanatun Selatan (2002-2005) dan SMA Negeri 4 Kupang (2005-2008). Penulis melanjutkan jenjang pendidikan S1 (2008-2012) di Jurusan Kimia Fakultas Sains dan Teknik Universitas Nusa Cendana melalui jalur SNMPTN. Selama kuliah S1, penulis mengambil riset di bidang minat Kimia Fisik. Selama masa studinya penulis aktif dalam kegiatan organisasi. Penulis pernah menjabat sebagai wakil ketua OSIS SMPN 1 Amanatun Selatan, koordinator bidang pelayanan anak, remaja dan taruna JBOT dan bendahara himpunan mahasiswa jurusan (HMJ) kimia. Selain itu, penulis pernah meraih penghargaan dibidang keilmuan sebagai juara 3 olimpiade nasional SMA tingkat kota Kupang (2007) dibidang studi kimia dan juara 2 kontes fisika selama menempuh studi ditingkat SMA. Setelah mendapatkan gelar sarjana, penulis memperoleh beasiswa LPDP (Lembaga Pengelola Dana Pendidikan) dalam negeri jalur afirmasi dan melanjutkan studi S2 di jurusan Kimia FMIPA Institut Teknologi Sepuluh November. Penulis tercatat sebagai mahasiswa S2 Kimia angkatan 2014 dengan nomor registrasi pendaftaran (NRP). 1414201 011. Pada akhir masa studi, penulis melakukan penelitian di bidang minat Kimia Fisik, dibawah bimbingan Ibu Nurul Widiastuti, M.Si., Ph.D.

Email : madalakapu09@gmail.com

Mobile: 0852 3777 4469